THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITÉ SCIENTIFIQUE ET MÉDICALE DE GRENOBLE

pour obtenir

LE GRADE DE DOCTEUR-INGÉNIEUR

par

Vinayak POTEY
Master of Engineering (Inde)

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DU COURANT POST-ARC

Soutenue le 11 avril 1972 devant la Commission d'examen

JURY

MM.	E. PILLET,	*Président*
	M. POLOUJADOFF,	*Examinateurs*
	M. IVANES,	
	Y. PELENC,	*Invité*

THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITÉ SCIENTIFIQUE ET MÉDICALE DE GRENOBLE

pour obtenir

LE GRADE DE DOCTEUR-INGÉNIEUR

par

Vinayak POTEY
Master of Engineering (Inde)

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DU COURANT POST-ARC

Soutenue le 11 avril 1972 devant la Commission d'examen

JURY

MM. E. PILLET,	*Président*
M. POLOUJADOFF,	*Examinateurs*
M. IVANES,	
Y. PELENC,	*Invité*

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

UNIVERSITE SCIENTIFIQUE
ET MEDICALE DE GRENOBLE

LISTE DES PROFESSEURS

Président : Monsieur Michel SOUTIF
Vice-Président : Monsieur Gabriel CAU

PROFESSEURS TITULAIRES

MM.	ANGLES D'AURIAC Paul	Mécanique des fluides
	ARNAUD Georges	Clinique des maladies infectieuses
	ARNAUD Paul	Chimie
	AUBERT Guy	Physique
	AYANT Yves	Physique approfondie
Mme	BARBIER Marie-Jeanne	Electrochimie
MM.	BARBIER Jean-Claude	Physique expérimentale
	BARBIER Reynold	Géologie appliquée
	BARJON Robert	Physique nucléaire
	BARNOUD Fernand	Biosynthèse de la cellulose
	BARRA Jean-René	Statistiques
	BARRIE Joseph	Clinique chirurgicale
	BENOIT Jean	Radioélectricité
	BERNARD Alain	Mathématiques Pures
	BESSON Jean	Electrochimie
	BEZES Henri	Chirurgie générale
	BLAMBERT Maurice	Mathématiques Pures
	BOLLIET Louis	Informatique (IUT B)
	BONNET Georges	Electrotechnique
	BONNET Jean-Louis	Clinique ophtalmologique
	BONNET-EYMARD Joseph	Pathologie médicale
	BONNIER Etienne	Electrochimie Electrométallurgie
	BOUCHERLE André	Chimie et Toxicologie
	BOUCHEZ Robert	Physique nucléaire
	BRAVARD Yves	Géographie
	BRISSONNEAU Pierre	Physique du Solide
	BUYLE-BODIN Maurice	Electronique
	CABANAC Jean	Pathologie chirurgicale
	CABANEL Guy	Clinique rhumatologique et hydrologie
	CALAS François	Anatomie
	CARRAZ Gilbert	Biologie animale et pharmacodynamie
	CAU Gabriel	Médecine légale et Toxicologie
	CAUQUIS Georges	Chimie organique
	CHABAUTY Claude	Mathématiques Pures
	CHARACHON Robert	Oto-Rhino-Laryngologie
	CHATEAU Robert	Thérapeutique
	CHENE Marcel	Chimie papetière
	COEUR André	Pharmacie chimique
	CONTAMIN Robert	Clinique gynécologique
	COUDERC Pierre	Anatomie Pathologique
	CRAYA Antoine	Mécanique
Mme	DEBELMAS Anne-Marie	Matière médicale
MM.	DEBELMAS Jacques	Géologie générale
	DEGRANGE Charles	Zoologie
	DESSAUX Georges	Physiologie animale
	DODU Jacques	Mécanique appliquée
	DOLIQUE Jean-Michel	Physique des plasmas
	DREYFUS Bernard	Thermodynamique
	DUCROS Pierre	Cristallographie
	DUGOIS Pierre	Clinique de Dermatologie et Syphiligraphie
	FAU René	Clinique neuro-psychiatrique
	FELICI Noël	Electrostatique
	GAGNAIRE Didier	Chimie physique
	GALLISSOT François	Mathématiques Pures
	GALVANI Octave	Mathématiques Pures
	GASTINEL Noël	Analyse numérique
	GERBER Robert	Mathématiques Pures

MM.	GIRAUD Pierre	Géologie
	KLEIN Joseph	Mathématiques Pures
Mme	KOFLER Lucie	Botanique et Physiologie végétale
MM.	KOSZUL Jean-Louis	Mathématiques Pures
	KRAVTCHENKO Julien	Mécanique
	KUNTZMANN Jean	Mathématiques Appliquées
	LACAZE Albert	Thermodynamique
	LACHARME Jean	Biologie végétale
	LATREILLE René	Chirurgie générale
	LATURAZE Jean	Biochimie pharmaceutique
	LAURENT Pierre	Mathématiques Appliquées
	LEDRU Jean	Clinique médicale B
	LLIBOUTRY Louis	Géophysique
	LOUP Jean	Géographie
Mle	LUTZ Elisabeth	Mathématiques Pures
	MALGRANGE Bernard	Mathématiques Pures
	MALINAS Yves	Clinique obstétricale
	MARTIN-NOEL Pierre	Sémiologie médicale
	MASSEPORT Jean	Géographie
	MAZARE Yves	Clinique médicale A
	MICHEL Robert	Minéralogie et Pétrographie
	MOURIQUAND Claude	Histologie
	MOUSSA André	Chimie nucléaire
	NEEL Louis	Physique du Solide
	OZENDA Paul	Botanique
	PAUTHENET René	Electrotechnique
	PAYAN Jean-Jacques	Mathématiques Pures
	PEBAY-PEYROULA Jean-Claude	Physique
	PERRET René	Servomécanismes
	PILLET Emile	Physique Industrielle
	RASSAT André	Chimie systématique
	RENARD Michel	Thermodynamique
	REULOS René	Physique Industrielle
	RINALDI Renaud	Physique
	ROGET Jean	Clinique de pédiatrie et de puériculture
	SANTON Lucien	Mécanique
	SEIGNEURIN Raymond	Microbiologie et Hygiène
	SENGEL Philippe	Zoologie
	SILBERT Robert	Mécanique des fluides
	SOUTIF Michel	Physique générale
	TANCHE Maurice	Physiologie
	TRAYNARD Philippe	Chimie générale
	VAILLAND François	Zoologie
	VALENTIN Jacques	Physique Nucléaire
	VAUQUOIS Bernard	Calcul électronique
Mme	VERAIN Alice	Pharmacie galénique
M.	VERAIN André	Physique
Mme	VEYRET Germaine	Géographie
MM.	VEYRET Paul	Géographie
	VIGNAIS Pierre	Biochimie médicale
	YOCCOZ Jean	Physique nucléaire théorique

PROFESSEURS ASSOCIES

MM.	BULLEMER Bernhard	Physique
	HANO JUN-ICHI	Mathématiques Pures
	STEPHENS Michaël	Mathématiques Appliquées

PROFESSEURS SANS CHAIRE

MM.	BEAUDOING André	Pédiatrie
Mme	BERTRANDIAS Françoise	Mathématiques Pures
MM.	BERTRANDIAS Jean-Paul	Mathématiques appliquées
	BIAREZ Jean-Pierre	Mécanique
	BONNETAIN Lucien	Chimie minérale
Mme	BONNIER Jane	Chimie générale
MM.	CARLIER Georges	Biologie végétale
	COHEN Joseph	Electrotechnique
	COUMES André	Radioélectricité
	DEPASSEL Roger	Mécanique des Fluides
	DEPORTES Charles	Chimie minérale
	DESRE Pierre	Métallurgie
	GAUTHIER Yves	Sciences biologiques
	GEINDRE Michel	Electroradiologie
	GERMAIN Jean Pierre	Mécanique
	GIDON Paul	Géologie et Minéralogie
	GLENAT René	Chimie organique
	HACQUES Gérard	Calcul numérique
	JANIN Bernard	Géographie
Mme	KAHANE Josette	Physique
MM.	MULLER Jean-Michel	Thérapeutique
	PERRIAUX Jean-Jacques	Géologie et minéralogie
	POULOUJADOFF Michel	Electrotechnique
	REBECQ Jacques	Biologie (CUS)
	REVOL Michel	Urologie
	REYMOND Jean-Charles	Chirurgie générale
	ROBERT André	Chimie papetière
	SARRAZIN Roger	Anatomie et chirurgie
	SARROT-REYNAULD Jean	Géologie
	SIBILLE Robert	Construction Mécanique
	SIROT Louis	Chirurgie générale
Mme	SOUTIF Jeanne	Physique générale

MAITRES DE CONFERENCES ET MAITRES DE CONFERENCES AGREGES

Mle	AGNIUS-DELORD Claudine	Physique pharmaceutique
	ALARY Josette	Chimie analytique
MM.	AMBLARD Pierre	Dermatologie
	AMBROISE-THOMAS Pierre	Parasitologie
	ARMAND Yves	Chimie
	BEGUIN Claude	Chimie organique
	BELORIZKY Elie	Physique
	BENZAKEN Claude	Mathématiques Appliquées
	BILLET Jean	Géographie
	BLIMAN Samuel	Electronique (EIE)
	BLOCH Daniel	Electrotechnique
Mme	BOUCHE Liane	Mathématiques (CUS)
MM.	BOUCHET Yves	Anatomie
	BOUSSARD Jean-Claude	Mathématiques Appliquées
	BOUVARD Maurice	Mécanique des Fluides
	BRIERE Georges	Physique expérimentale

MM.	BRODEAU François	Mathématiques (IUT B)
	BRUGEL Lucien	Energétique
	BUISSON Roger	Physique
	BUTEL Jean	Orthopédie
	CHAMBAZ Edmond	Biochimie médicale
	CHAMPETIER Jean	Anatomie et organogénèse
	CHIAVERINA Jean	Biologie appliquée (EFP)
	CHIBON Pierre	Biologie animale
	COHEN-ADDAD Jean-Pierre	Spectrométrie physique
	COLOMB Maurice	Biochimie médicale
	CONTE René	Physique
	CROUZET Guy	Radiologie
	DURAND Francis	Métallurgie
	DUSSAUD René	Mathématiques (CUS)
Mme	ETERRADOSSI Jacqueline	Physiologie
MM.	FAURE Jacques	Médecine légale
	GAVEND Michel	Pharmacologie
	GENSAC Pierre	Botanique
	GIDON Maurice	Géologie
	GRIFFITHS Michaël	Mathématiques Appliquées
	GROULADE Joseph	Biochimie médicale
	HOLLARD Daniel	Hématologie
	HUGONOT Robert	Hygiène et Médecine préventive
	IDELMAN Simon	Physiologie animale
	IVANES Marcel	Electricité
	JALBERT Pierre	Histologie
	JOLY Jean-René	Mathématiques Pures
	JOUBERT Jean-Claude	Physique du Solide
	JULLIEN Pierre	Mathématiques Pures
	KAHANE André	Physique générale
	KUHN Gérard	Physique
Mme	LAJZEROWICZ Jeannine	Physique
MM.	LAJZEROWICZ Joseph	Physique
	LANCIA Roland	Physique atomique
	LE JUNTER Noël	Electronique
	LEROY Philippe	Mathématiques
	LOISEAUX Jean-Marie	Physique Nucléaire
	LONGEQUEUE Jean-Pierre	Physique Nucléaire
	LUU DUC Cuong	Chimie Organique
	MACHE Régis	Physiologie végétale
	MAGNIN Robert	Hygiène et Médecine préventive
	MARECHAL Jean	Mécanique
	MARTIN-BOUYER Michel	Chimie (CUS)
	MAYNARD Roger	Physique du Solide
	MICHOULIER Jean	Physique (I.U.T. "A")
	MICOUD Max	Maladies infectieuses
	MOREAU René	Hydraulique (INP)
	NEGRE Robert	Mécanique
	PARAMELLE Bernard	Pneumologie
	PECCOUD François	Analyse (IUT B)
	PEFFEN René	Métallurgie
	PELMONT Jean	Physiologie animale
	PERRET Jean	Neurologie
	PERRIN Louis	Pathologie expérimentale
	PFISTER Jean-Claude	Physique du Solide
	PHELIP Xavier	Rhumatologie
Mlle	PIERY Yvette	Biologie animale

MM.	RACHAIL Michel	Médecine interne
	RACINET Claude	Gynécologie et obstétrique
	RICHARD Lucien	Botanique
Mme	RINAUDO Marguerite	Chimie macromoléculaire
MM.	ROMIER Guy	Mathématiques (IUT P)
	ROUGEMONT (DE) Jacques	Neuro-Chirurgie
	SHAN Jean Claude	Chimie Générale
	STIEGLITZ Paul	Anesthésiologie
	STOEBNER Pierre	Anatomie pathologique
	VAN CUTSEM Bernard	Mathématiques Appliquées
	VEILLON Gérard	Mathématiques Appliquées (INP)
	VIALON Pierre	Géologie
	VOOG Robert	Médecine interne
	VROUSSOS Constantin	Radiologie
	ZADWORNY François	Electronique

MAITRES DE CONFERENCES ASSOCIES

MM.	BOUDOURIS Georges	Radioélectricité
	CHEEKE John	Thermodynamique
	GOLDSCHMIDT Hubert	Mathématiques
	SIDNEY STUARD	Mathématiques Pures
	YACOUD Mahmoud	Médecine légale

CHARGES DE FONCTIONS DE MAITRES DE CONFERENCES

Mme	BERIEL Hélène	Physiologie
Mme	RENAUDET Jacqueline	Microbiologie

Fait le 16 Novembre 1971

TABLE DES MATIERES

RÉSUMÉ 1

1. INTRODUCTION 3

2. GÉNÉRALITÉS 5

2.1. interruption d'un courant post-arc 5

2.1.1. problème d'interruption d'un courant alternatif 5

2.1.2. rôle de l'arc dans l'interruption du courant 7

2.1.3. théorie d'extinction de l'arc dans les disjoncteurs à courant alternatif 9

2.2. étude des phénomènes au voisinage du zéro de courant 11

2.2.1. coupure idéale 11

2.2.2. coupure naturelle 13

2.2.3. coupure anticipée (arrachement du courant) 15

2.2.4. coupure anticipée avec oscillation d'arc 17

3. PHÉNOMENE DU COURANT POST-ARC 19

3.1. existence du courant post-arc 19

3.2. explication physique 19

3.3. importance du courant post-arc dans le processus de coupure 21

3.4. modèle mathématique de l'arc 23

3.5. conductibilité électrique de l'arc 27

3.6. calcul des courants post-arc 35

4. MESURE DES COURANTS POST-ARC 47

4.1. problème de mesure des courants post-arc 47
4.1.1. importance du problème 47
4.1.2. conditions à remplir par l'appareillage de mesure 47

4.2. étude des travaux précédents 49
4.2.1. moyens de mesure des courants post-arc 49
4.2.2. synthèse des appareils de mesure 55
4.2.3. erreurs de mesures 55
4.2.4. synthèse des résultats publiés 59

5. LES NOUVEAUX MOYENS DE MESURE DES COURANTS POST-ARC 63

5.1. nécessité d'entreprendre la recherche de nouveaux moyens de mesure 63

5.2. mesure des courants post-arc à l'aide de l'effet Hall 63
5.2.1. introduction 63
5.2.2. explication de l'effet Hall 65
5.2.3. utilisation des générateurs à effet Hall pour mesurer le courant 67
5.2.4. dispositif pour mesurer les courants post-arc 73
5.2.5. réalisation de l'appareil de mesure 83
5.2.6. ampéremètre à effet Hall 95

5.3. mesure des courants post-arc à l'aide de l'effet Faraday 97
5.3.1. introduction 97
5.3.2. rappel de l'effet Faraday 97
5.3.3. dispositif expérimental de principe 97
5.3.4. perturbation de fonctionnement 103
5.3.5. réalisation de l'appareil 105
5.3.6. caractéristiques principales de l'appareil 109

5.4. déclencheur au zéro du courant 113
5.4.1. introduction 113
5.4.2. déclencheur au zéro du courant à effet Hall 113

6. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX 119

6.1. essais de mise au point 119
6.1.1. bande passante trop faible 119
6.1.2. dérives de zéro 119
6.1.3. signaux parasites 119

6.2. vérification de performance des dispositifs de mesure 123
6.2.1. circuit d'essais 123
6.2.2. résultats d'essais de performance des dispositifs de mesure 123

6.3. mesure des courants post-arc 125
6.3.1. mesure du courant post-arc à l'aide du dispositif à effet Hall 125
6.3.2. mesures simultanées des courants post-arc par les deux nouveaux dispositifs 125
6.3.3. comparaison des enregistrements du courant par les nouveaux dispositifs et un shunt 129

7. CONCLUSION 131

Remerciements 133

BIBLIOGRAPHIE 135

RÉSUMÉ

L'étude du courant post-arc dans les disjoncteurs à courant alternatif présente un grand intérêt puisque la réussite d'une coupure dépend du comportement du milieu post-arc. Il est très difficile de mesurer le courant post-arc car, d'une part, l'amplitude de ce courant est 10^3 à 10^5 fois plus petite que le courant qui vient d'être coupé et, d'autre part, sa durée est 10 à 300 microsecondes. L'analyse des travaux publiés nous permet de constater que le shunt à faible constante de temps est le seul moyen convenable utilisé jusqu'à présent. Outre des erreurs difficiles à éliminer, le shunt met en liaison galvanique le circuit de mesure et le circuit d'essais, ce qui peut être gênant. Deux nouveaux procédés de mesure, le dispositif à effet Hall et le dispositif à effet Faraday, sont étudiés et expérimentés. Ces nouveaux appareils possèdent, entre autres, l'avantage d'isoler le circuit de mesure du circuit d'essais. Un déclencheur au zéro de courant à effet Hall sûr et précis est étudié et mis au point. Une série de mesures simultanées avec les différents détecteurs permet de juger de l'efficacité et de la fiabilité des nouveaux dispositifs. On calcule les courants post-arc à partir du modèle mathématique de l'arc d'Otto MAYR et les résultats de mesure permettent d'évaluer la validité d'un tel calcul et d'envisager la détermination expérimentale des paramètres du modèle.

1. INTRODUCTION

Un disjoncteur idéal à courant alternatif serait un appareil dans lequel, lors de son ouverture, la résistance s'opposant au courant varierait instantanément, au moment du passage de courant par zéro, de la valeur nulle à une valeur infiniment grande. Or, dans les disjoncteurs, il se produit au moment de la séparation des contacts un arc, après l'extinction duquel le milieu se trouvant entre les contacts est encore partiellement ionisé. Il en résulte une conductibilité qui provoque, lors du rétablissement de la tension, l'apparition d'un courant que l'on a dénommé courant post-arc.

La mesure du courant post-arc, qui est souvent 10^3 à 10^5 fois plus petit que le courant qui vient d'être coupé et qui ne dure, la plupart du temps, que 10 à 300 micro-secondes, est extrêmement difficile.

Les recherches sur les mesures de courants post-arc présentent un intérêt certain puisque la réussite d'une coupure dépend du comportement du milieu post-arc. De plus, ces recherches pourraient apporter d'intéressants résultats sur l'interaction entre le disjoncteur et le circuit, de même que sur le mécanisme de réallumage.

Au cours de ces dernières années, des recherches sur les courants post-arc ont été mentionnées dans de nombreuses publications. Ces études ont essentiellement porté sur l'existence et le comportement des courants post-arc dans les disjoncteurs. La plupart des mesures de courants post-arc mentionnées dans ces publications ont été réalisées en utilisant un shunt à faible résistance et un amplificateur.

Les résultats publiés se contredisent cependant beaucoup et, dans certains cas, la possibilité de fausses mesures ne peut pas être exclue. Il est donc apparu essentiel de chercher des moyens de mesure différents de celui utilisé jusqu'à présent et qui pourront nous donner des résultats corrects. Nous avons mis au point deux nouveaux appareils de mesure qui fonctionnent d'après deux principes physiquement différents. Nous avons également réalisé un déclencheur qui permet de donner l'ordre de balayage à l'oscilloscope à un moment précis avant le passage au zéro du courant.

En faisant des mesures simultanées avec ces nouveaux appareils et avec le shunt, on peut obtenir des résultats auxquels on peut se fier.

Par ailleurs, nous avons fait une tentative pour calculer les courants post-arc à partir des données physiques à l'aide d'un modèle mathématique de l'arc.

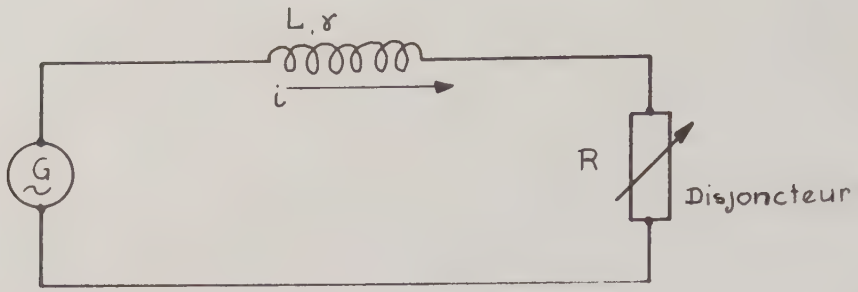
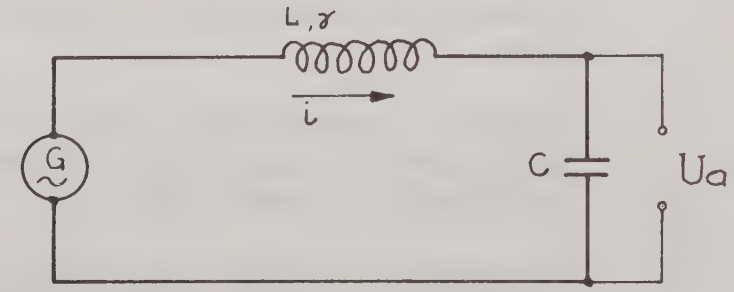
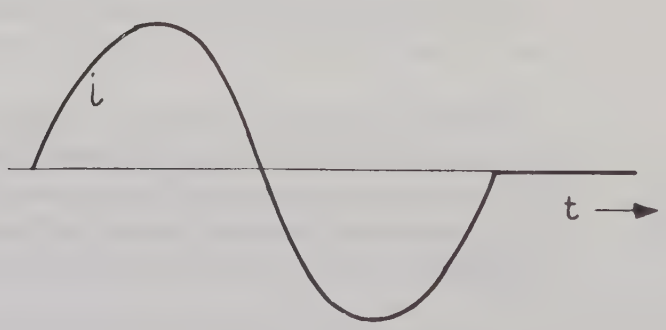


Fig. 2.1. - Interruption d'un circuit en courant alternatif
Schéma du circuit





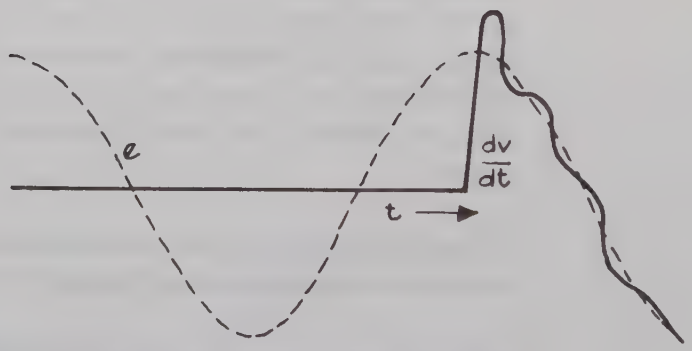


Fig. 2.2. - Interruption d'un circuit en courant alternatif
Tension de rétablissement

2. GENERALITES

2.1. interruption d'un courant alternatif

L'interruption du courant par disjoncteur s'opère en séparant les pièces de contact et en empêchant, lors d'un passage par zéro de courant, le réallumage de l'arc qui s'est établi entre elles.

2.1.1. problème d'interruption d'un courant alternatif

Pour mieux comprendre le problème d'interruption de courant, considérons le cas théorique le plus simple, celui d'un circuit alimenté en courant alternatif dans lequel le disjoncteur est remplacé par une résistance variable (Fig. 2.1.). Au cours de l'ouverture du disjoncteur, sa résistance augmente de plus en plus jusqu'à ce qu'elle devienne infinie et finalement le courant sera coupé. Cette variation de résistance pourra commencer à un instant quelconque par rapport à l'onde de courant. On peut, en particulier, penser à une possibilité de coupure sans aucune dépense d'énergie, si la variation de cette résistance se produit à l'instant précis du passage à zéro du courant. Cette synchronisation judicieuse constitue une première difficulté grave.

Supposons néanmoins que cette synchronisation soit parfaite. La résistance est donc maintenant infinie et une tension variable, tension de rétablissement, apparaît aux bornes des contacts de l'appareil. Cette tension tend à rejoindre la tension du générateur dont la valeur pourra être maximale au moment du passage à zéro du courant, si le circuit est fortement inductif. La présence de capacités parasites, toujours existantes, en parallèle sur le disjoncteur, donne naissance à un régime transitoire assurant le raccordement entre la tension antérieurement nulle et la nouvelle tension imposée par la source (Fig. 2.2.).

La forme de ce régime transitoire est une fonction des caractéristiques du circuit et conditionne la vitesse d'application de la contrainte diélectrique aux bornes de l'appareil (du/dt) qui peut atteindre plusieurs kilovolts par micro-seconde. Ceci veut dire que le disjoncteur, qui est conducteur à l'instant t=0, doit supporter une tension de plusieurs kilovolts une micro-seconde plus tard, ce qui nécessite l'éloignement des contacts à une vitesse de l'ordre du kilomètre/seconde. Une solution mécanique ne peut pas être apportée à ce problème.

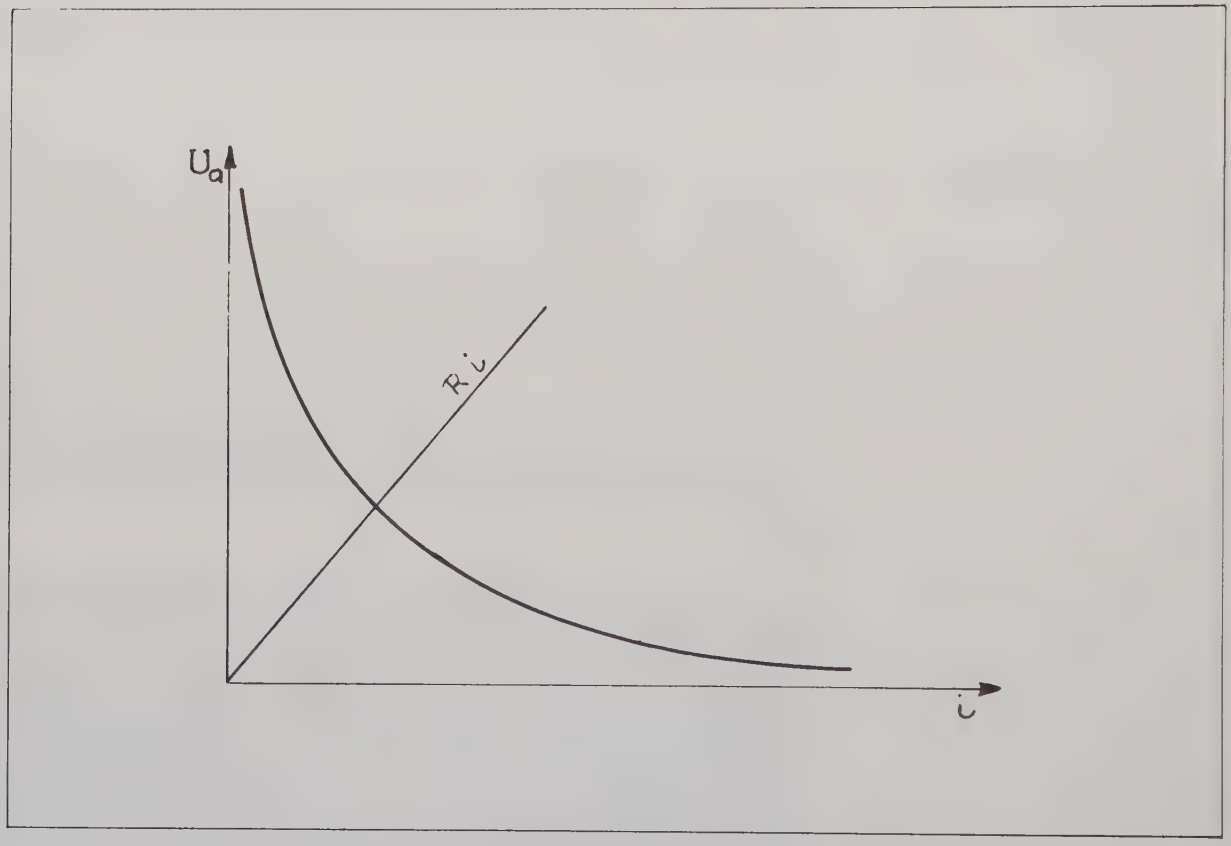


Fig. 2.3. - Caractéristique de l'arc électrique

2.1.2 rôle de l'arc dans l'interruption du courant

Nous avons vu que les problèmes posés par l'interruption du courant en l'absence de l'arc sont presque insurmontables. En réalité, la séparation de deux contacts du disjoncteur, traversés par le courant, donne naissance à un arc électrique. Cet arc électrique joue un rôle nécessaire et très utile dans l'interruption du courant.

En premier lieu, l'arc permet au courant de continuer à passer, en dépit des contacts qui se séparent. Si un arc ne se formait pas, la brusque réduction de courant au zéro causerait une libération d'énergie électro-magnétique et développerait ainsi une tension extrêmement élevée. L'arc qui se forme empêche le développement d'une telle tension. Dans un interrupteur bien conçu, l'arc permet de réduire le courant jusqu'au point où il ne se développe plus de tension dangereusement élevée.

Finalement, l'arc synchronise l'introduction d'une résistance élevée au moment où le courant a une valeur nulle. Ce sont ses caractéristiques électro-thermiques qui vont lui permettre de remplir ce rôle.

Caractéristique de l'arc électrique

L'arc est le résultat de l'ionisation, à haute température, du milieu gazeux qui existe entre les deux contacts d'un disjoncteur. Ce canal ionisé a une densité de courant sensiblement constante qui lui donne une caractéristique très particulière. La chute de tension dans un arc décroît en fonction du courant qui le traverse (Fig. 2.3.). Il en résulte que la résistance de l'arc est d'autant plus faible que le courant est plus grand. On constate que la pente de cette caractéristique est l'inverse de celle d'une résistance normale R (caractéristique «négative»).

Ainsi, l'arc introduit une résistance très faible à l'écoulement du courant, tant que le courant diffère sensiblement du zéro puis, lorsque le courant décroît vers zéro, la résistance de l'arc augmente automatiquement, d'autant plus vite que le courant est faible. Il choisit un intervalle de temps de quelques micro-secondes englobant le passage au zéro du courant, pour effectuer son «coup de grâce» et ouvrir effectivement le circuit en développant une résistance infinie.

Ainsi, on a vu comment l'arc facilite l'interruption du courant. Mais pour que l'interruption du courant soit réussie, l'extinction de l'arc au dernier passage au zéro du courant est nécessaire. Ceci nous amène à étudier de plus près le problème de l'extinction de l'arc.

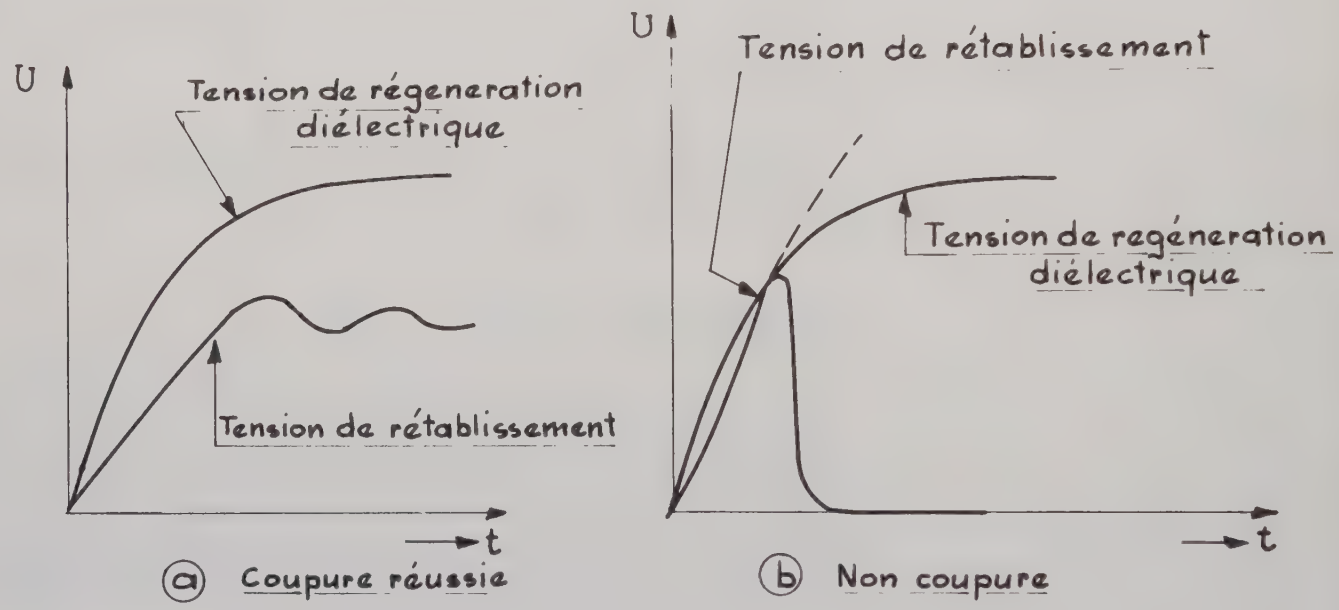


Fig. 2.4. - Conditions d'extinction de l'arc

2.1.3. théorie d'extinction de l'arc électrique dans les disjoncteurs à courant alternatif

La première théorie expliquant le phénomène d'extinction de l'arc a été présentée en 1928 par J. SLEPIAN.[33]

On suppose que la résistance de l'arc devient infinie lorsque le courant s'annule. On conçoit cependant que la rigidité diélectrique de l'intervalle entre les contacts n'atteint pas instantanément sa pleine valeur. Compte-tenu de l'état d'ionisation antérieur, cet intervalle va récupérer progressivement ses qualités suivant une certaine loi dite «courbe de régénération diélectrique».

Selon ce développement théorique, l'instant du passage du courant à zéro est le début d'une course qui se déroule entre la tension transitoire apparaissant aux bornes de l'appareil de coupure et la tenue diélectrique du trajet de coupure. Dans ce cas, l'évolution de la tension ne dépend que des propriétés du circuit; en même temps, la rigidité électrique n'est déterminée, selon cette théorie, que par les caractéristiques de l'appareil, c'est-à-dire par ses moyens de désionisation, compte tenu de l'énergie dépensée pendant la période d'attente.

Dès que la tension transitoire de rétablissement atteint la valeur momentanée de la rigidité diélectrique du trajet de l'arc, il se produit un réallumage de l'arc (Fig. 2.4.). Si par contre, la tension transitoire de rétablissement évolue toujours à un niveau inférieur à la tension nécessaire au réallumage, le courant reste définitivement interrompu.

Cet aspect un peu simple du problème, comparaison de deux grandeurs indépendantes, se complique au moins dans certains cas (courants élevés) et pour certains types d'interrupteurs.

Malgré sa signification historique, cette théorie n'est pas complète. Elle n'est pas en état de fournir une explication satisfaisante du phénomène d'extinction et de réallumage des arcs de rupture à courant élevé. Elle ne tient pas compte de la possibilité d'une conductivité post-arc.

Théorie dite «énergétique»

La théorie dite «énergétique» présentée pour la première fois par CASSIE [9] présuppose l'existence d'une conductibilité post-arc. Le processus de réamorçage résulte alors d'une rupture d'équilibre énergétique, l'énergie fournie à l'intervalle d'interruption par le courant post-arc étant supérieure à celle qui en est extraite. Cette théorie de réamorçage thermique sera longuement discutée dans le chapitre 3 intitulé «phénomène du courant post-arc».

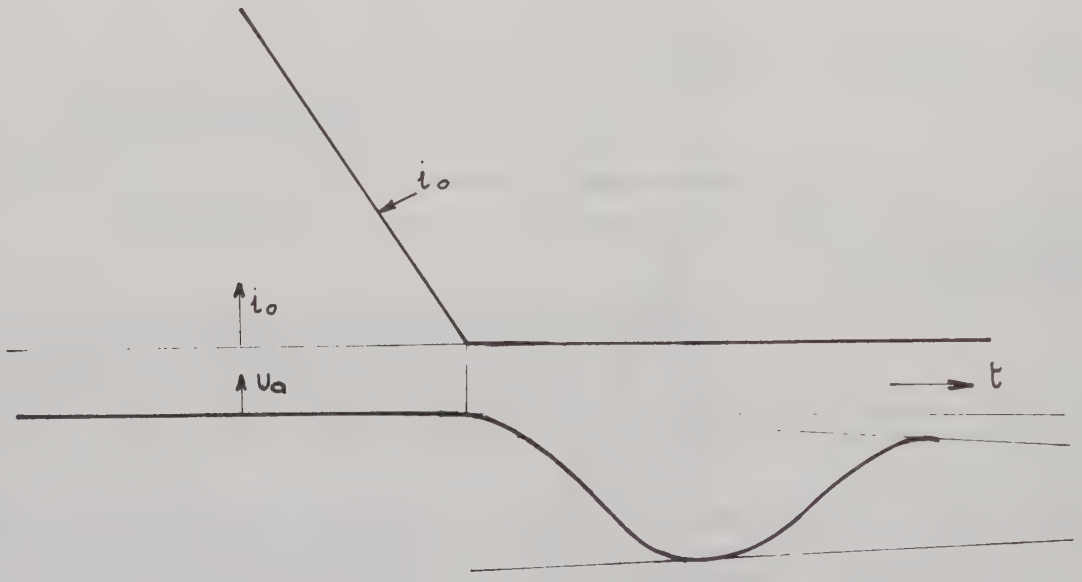


Fig. 2.5. - Coupure idéale

i_o : courant idéal

U_a : tension aux bornes du disjoncteur

Ces études nous permettent de conclure que la réussite d'une coupure dépend du comportement de l'arc dans l'intervalle des contacts au voisinage du zéro de courant. Ceci nous amène à étudier plus profondément les phénomènes qui se passent au voisinage du zéro de courant.

2.2. étude des phénomènes au voisinage du zéro de courant

Le courant peut, avant la coupure, s'approcher de zéro de différentes façons, selon les caractéristiques du circuit ou celles du disjoncteur. On peut ainsi faire les distinctions suivantes:

2.2.1. coupure idéale

Considérons le cas le plus simple, dans lequel la tension de l'arc est négligeable par rapport à la force électromotrice de la source. Supposons que l'espace de coupure perde toute conductibilité immédiatement au passage naturel du courant par zéro (Fig. 2.5.).

La force électromotrice e est égale à $e=E \cos \omega t$. Si l'on néglige la résistance du circuit, le courant (idéal) est donné par:

$$\begin{aligned} i_o &= \frac{1}{L} \int e \, dt \\ &= \frac{E}{\omega L} \sin \omega t \\ &= \sqrt{2} \, I_{o \text{ eff.}} \sin \omega t \end{aligned} \qquad (1)$$

La vitesse de décroissance du courant au passage par zéro est donnée par:

$$\left(\frac{di_o}{dt}_{i \to 0}\right) = \sqrt{2} \, \omega I_{o \text{ eff.}} \qquad (2)$$

Dans ce cas, l'espace de coupure se comporte, après interruption du courant, comme un diélectrique de rigidité croissante, laquelle ne dépend que de l'intensité du courant coupé et de la construction du disjoncteur. La tension transitoire de rétablissement appliquée au disjoncteur est indépendante de ce qui se passe avant la coupure du courant ainsi que des propriétés de l'appareil, et ne dépend donc que du réseau.

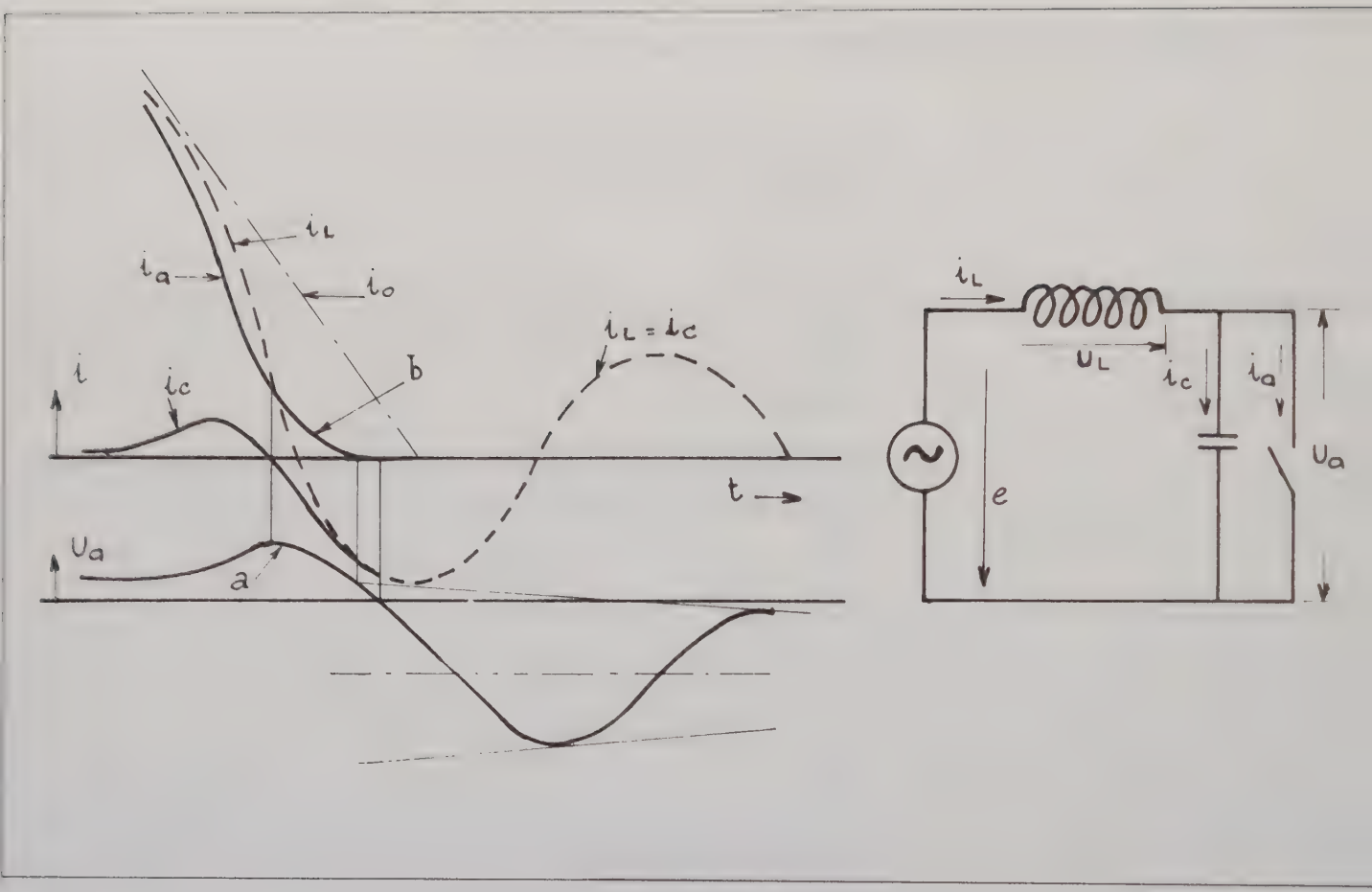


Fig. 2.6. - Coupure naturelle

a : pointe d'extinction

b : courant supplémentaire

2.2.2. coupure naturelle

La coupure qui se présente bien plus fréquemment est celle pour laquelle la tension d'arc n'est plus négligeable par rapport à la chute de tension dans l'impédance du circuit; de ce fait, elle peut modifier la forme du courant. La tension aux bornes du disjoncteur s'identifie à la tension d'arc jusqu'à l'annulation de courant et, ensuite, est imposée par le circuit; la conductibilité entre les contacts s'annule également au zéro du courant.

Dans ces conditions, la tension d'arc accuse bien, vers la fin de l'onde de courant, une pointe d'extinction, mais celle-ci n'a ni une grande amplitude ni une forte vitesse d'acroissement.

En se référant au schéma du circuit (fig. 2.6.), on a:

$$e = U_L + U_a \tag{3}$$

$$\text{avec } U_L = L\frac{di}{dt} \tag{4}$$

Etant donné que $\frac{di}{dt}$ est négative vers la fin de la demi-onde positive du courant, e étant d'ailleurs considéré comme constant pendant ce temps très court, tout accroissement de U_a entraîne une égale augmentation de la chute de tension négative U_L. Il s'ensuit donc que $\frac{di}{dt}$ doit croître, c'est-à-dire que le courant doit tendre vers zéro plus rapidement que le courant idéal i_o

$$\begin{aligned} i_L &= \frac{1}{L}\int U_L \, dt \\ &= \frac{1}{L}\int (e - U_a) \, dt \\ &= i_o - \frac{1}{L}\int U_a \, dt \end{aligned} \tag{5}$$

D'autre part, l'augmentation de U_a donne lieu à un courant capacitif

$$i_c = C\frac{dU_a}{dt} \tag{6}$$

Le courant d'arc devient:

$$i_a = i_L - i_c \tag{7}$$

$$= [i_o - \frac{1}{L}\int U_a dt] - [C\frac{dU_a}{dt}] \tag{8}$$

La pointe d'extinction se présente au moment où la décroissance du courant i_a parvient à compenser l'accroissement de la résistance d'arc R_a
c'est-à-dire

$$\text{Pour} \quad \frac{dU_a}{dt} = \frac{d}{dt}(i_a \, Ra) = i_a \frac{dR_a}{dt} + R_a \frac{di_a}{dt} = 0 \qquad (9)$$

A partir de cet instant, le second terme de l'équation devient prédominant de sorte que $\frac{dU_a}{dt}$ ainsi que i_c deviennent négatifs, ce qui signifie que la capacité se décharge dans le disjoncteur pendant la période de décroissance de la tension d'arc vers zéro. Ce mécanisme est illustré par la figure 2.6.

Ce type de coupure a les caractéristiques suivantes:
. Le courant d'arc i_a s'annule après i_L courant supplémentaire dans un intervalle de temps limité par la pointe d'extinction et le passage par zéro de la tension (à la limite, les passages par zéro du courant et de la tension peuvent coïncider).
. Le courant du circuit i_L s'annule peu après la pointe d'extinction.
. L'oscillation transitoire du circuit prend naissance après la pointe d'extinction et accuse initialement un amortissement dû au courant d'arc supplémentaire i_a et ce n'est qu'au passage à zéro de celui-ci que commence véritablement la libre oscillation transitoire.

La tension de l'arc dépend non seulement du disjoncteur mais aussi de la capacité du réseau. Le courant est lui-même influencé par la tension de l'arc et, de ce fait, n'est plus purement sinusoïdal.

L'arc perd toute conductibilité au passage du courant par zéro, à la suite duquel s'établit la course entre la rigidité diélectrique et la tension transitoire de rétablissement.

2.2.3. coupure anticipée (arrachement du courant)

Ce cas se présente dans les coupures des faibles courants. Dans ce cas, la tension d'arc augmente prématurément avant le passage naturel du courant par zéro et ceci, d'autant plus rapidement et avec une amplitude d'autant plus grande que l'intensité du courant est faible. Conformément à l'équation $I_c = C\frac{dU_a}{dt}$ le courant de charge de capacité s'accroît considérablement. Le courant d'arc ($I_a = I_L - I_c$) diminue alors beaucoup plus rapidement vers zéro que le courant i_L dans le cas naturel. En conséquence, et du fait de sa caractéristique négative, la tension nécessaire au maintien de l'arc augmente fortement et il s'ensuit une diminution encore plus rapide du courant, le résultat de cette interaction pouvant aboutir à une extinction soudaine de l'arc.

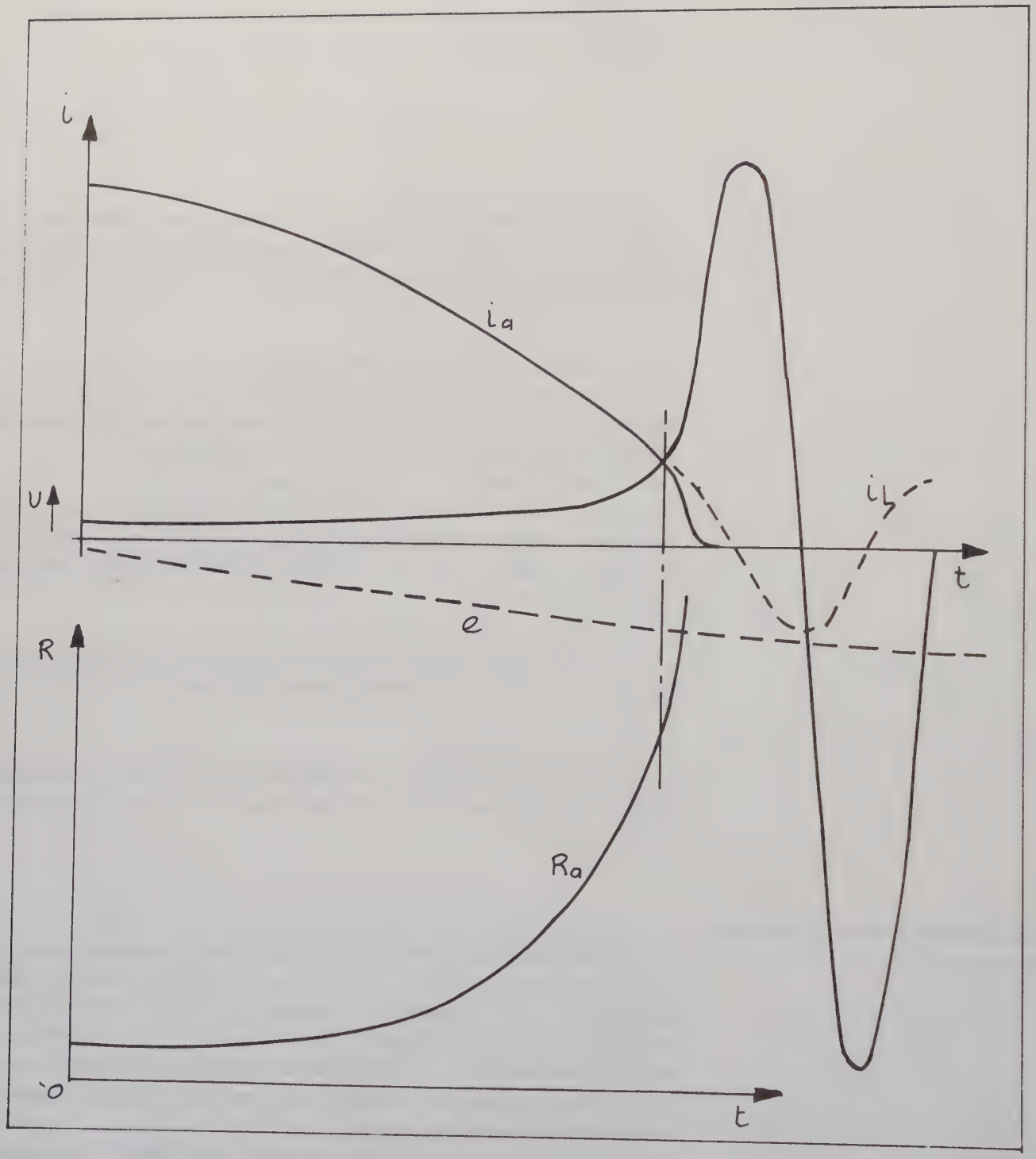


Fig. 2.7. - Coupure anticipée (arrachement du courant)
R_a : résistance de l'arc

La variation du courant d'arc, de la tension et de la résistance d'arc est représentée par la Fig. 2.7.

La vitesse d'accroissement de la tension aux bornes du disjoncteur est limitée par la capacité selon la relation suivante:

$$\frac{dU_a}{dt} = \frac{i_c}{C} \qquad (10)$$

Le courant de charge i_c, en aucune manière, ne peut surpasser le courant total i_L.

Si le taux d'accroissement de la tension ainsi autorisé est inférieur à ce qui est nécessaire à l'alimentation de l'arc, alors l'allure de la tension devient conditionnée par la capacité, et le circuit commence à osciller naturellement avant le zéro de tension; la capacité absorbe ainsi l'essentiel, puis la totalité du courant et l'arc s'éteint.

L'amplitude de la pointe d'extinction est donnée par l'énergie électromagnétique présente dans l'inductance au moment de l'arrachement du courant et par la valeur de la capacité parallèle.

La coupure anticipée a les particularités suivantes:
. Le courant dans le disjoncteur atteint zéro avant i_L et avant le maximum de tension
. Le relevé de tension accuse une brusque augmentation de pente à l'instant de l'arrachement du courant
. Le courant de réseau i_L s'annule à l'instant où la tension atteint sa valeur maximale
. L'oscillation transitoire du réseau prend naissance aussitôt après l'arrachement du courant

La pointe de tension élevée et de grande raideur, provoquée par l'arrachement du courant, est fonction des caractéristiques du réseau et de celles du disjoncteur.

2.2.4. coupure anticipée avec oscillation d'arc

Le fait d'avoir une capacité en parallèle avec l'arc ne conduit pas toujours à un simple arrachement du courant mais peut donner lieu, au contraire, à des oscillations d'amplitude croissante ou décroissante.

3. PHENOMENE DU COURANT POST-ARC

3.1. existence du courant post-arc

Par le terme courant post-arc, nous définissons le courant qui circule à travers le trajet de rupture immédiatement après le passage par zéro du courant à couper.

Dans les disjoncteurs, il se produit, au moment de la séparation des contacts, un arc après l'extinction duquel le milieu se trouvant entre ces contacts est encore partiellement ionisé. Il en résulte une conductibilité qui provoque, lors de l'établissement de la tension, l'apparition d'un courant post-arc.

Dès 1933, Van SICKLE et BERKEY[2] avaient noté l'existence d'un courant post-arc. BIERMANN[7] dans une conférence tenue en 1938, exposa une réflexion de O. MAYR[20] qui laissait entrevoir avec certitude l'existence d'un courant post-arc au moins dans une zone de transition déterminée.

CASSIE[9] a utilisé pour la première fois en 1939 l'existence du courant post-arc pour expliquer les phénomènes de coupure du courant alternatif. MASON[11] RIEDER[27] TESZNER[35] et ses collaborateurs ont également contribué à mettre en évidence l'existence du courant post-arc par des mesures directes sur les disjoncteurs

3.2. explication physique

On arrive à expliquer l'existence d'un courant post-arc lorsqu'on examine l'état d'ionisation du trajet de l'arc.

L'arc résulte de l'ionisation à haute température du milieu gazeux qui existe entre les deux contacts d'un disjoncteur.

La température axiale d'un arc soufflé de 3,4 kA s'élève, selon RUTGERS[15] à 16 000°k au moment du courant maximal, et à 9000°k au moment du passage par zéro du courant.

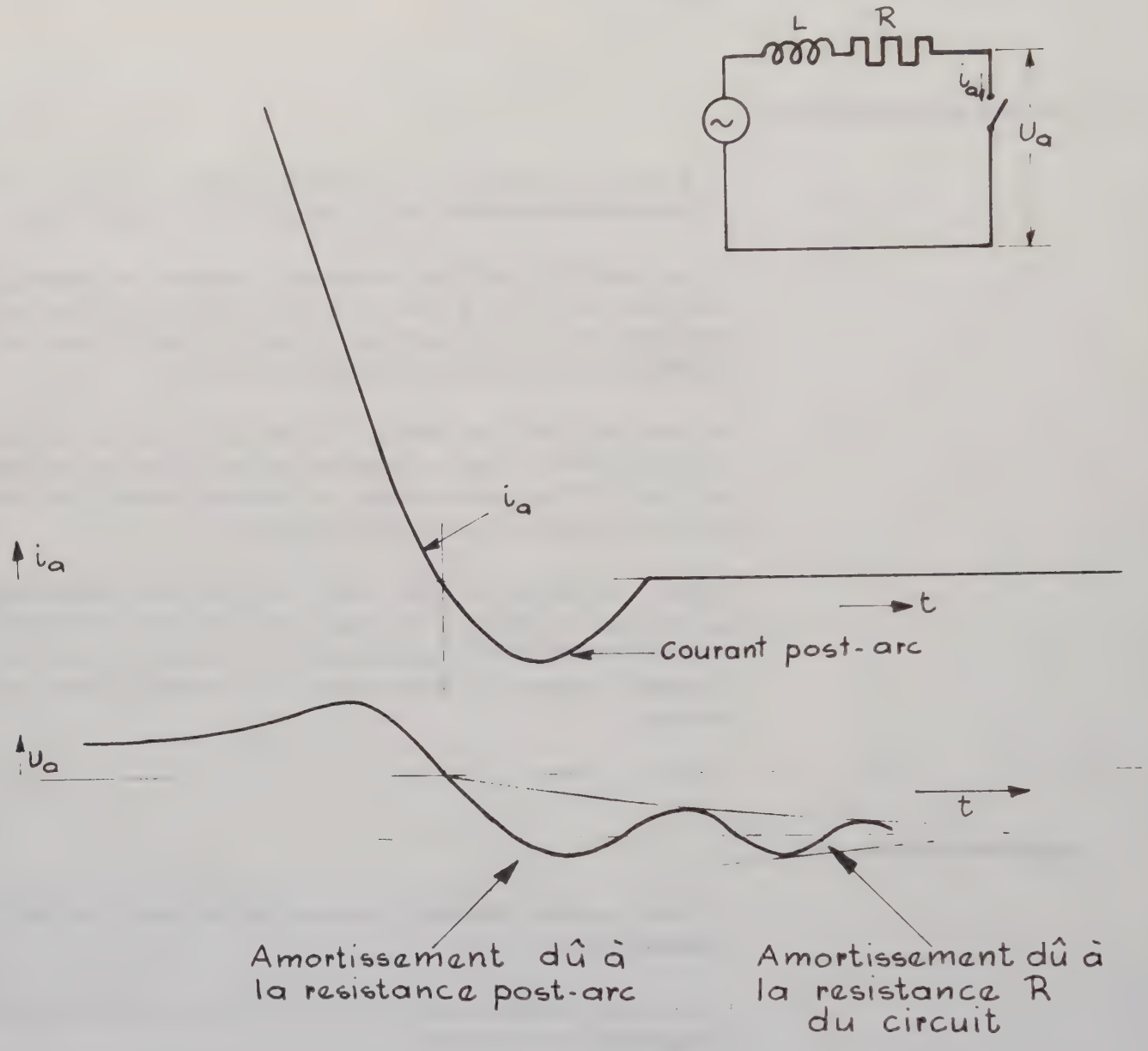


Fig. 3.1. - Coupure avec un courant post-arc

La conductibilité dans l'arc est essentiellement créée par une thermo-ionisation du trajet de l'arc. L'équilibre existe à condition que la conductibilité créée par la thermo-ionisation fournisse exactement l'énergie d'arc nécessaire à couvrir la perte de chaleur et d'ionisation due au fluide d'extinction. Si le courant diminue, la température et, par conséquent l'état d'ionisation, s'alignent avec un léger retard dû à l'inertie thermique, sur le courant diminuant. Bien que cela se produise très rapidement, la température et le degré d'ionisation du plasma sont encore importants au moment du passage par zéro du courant. Il y aura une certaine quantité de porteurs de charge dans le trajet de l'arc qui constitueront une ionisation résiduelle. Ces porteurs de charges résiduelles disparaissent selon les deux manières suivantes:

1. Par recombinaison avec les porteurs de charges de signe opposé
2. Par un écoulement éventuel du fluide extincteur entrainant une évacuation des charges résiduelles hors de l'intervalle séparant les contacts.

Le déplacement de ces charges résiduelles, sous l'influence du champ électrique, se manifeste sous la forme d'un courant post-arc.

Le courant post-arc constitue donc une mesure de la contrainte à laquelle le trajet de l'arc a été soumis par le courant précédent ainsi que du degré de sa reconstitution diélectrique due à la recombinaison et à l'action du courant du fluide extincteur.

3.3. importance du courant post-arc dans le processus de coupure

Le courant post-arc n'est pas seulement un symptôme qui caractérise l'état dans lequel se trouve l'espace de coupure, mais aussi un facteur qui peut influencer d'une façon décisive le processus de coupure.

La figure 3.1. indique le tracé de principe du courant post-arc observé lors d'une coupure de courant alternatif.

On constate que le courant d'arc i_a passe au zéro en même temps que la tension et continue à circuler ensuite avec une intensité qui, pendant un certain temps, suit plus ou moins la forme de la tension transitoire avant de s'annuler.

La présence du courant post-arc a deux effets importants:

Le passage d'un courant post-arc entraîne la production d'une énergie thermique par effet Joule dans l'espace situé entre les contacts. La puissance en jeu est égale au produit du courant post-arc et de la tension de rétablissement. Si la puissance ainsi produite est supérieure à celle qui est évacuée par rayonnement, convection, conduction thermique etc., la température de l'espace entre les contacts s'élève et il en résulte une augmentation du degré d'ionisation. Cette augmentation peut entraîner un accroissement du courant post-arc qui provoque, à son tour, une augmentation de la puissance en jeu et un nouvel échauffement. Le courant post-arc croît de plus en plus jusqu'à ce qu'il y ait un réamorçage d'origine thermique.

D'autre part, l'introduction de la résistance post-arc peut amortir fortement la tension de rétablissement. Il y a donc interaction entre le courant post-arc et la tension de rétablissement.

3.4. modèle mathématique de l'arc

La conductibilité résiduelle de l'arc, ainsi que l'ensemble des phénomènes au voisinage du zéro de courant, peuvent être représentés à l'aide d'un modèle mathématique de l'arc. Le problème de développement du modèle mathématique de l'arc a été traité par plusieurs auteurs.

Les travaux de MAYR[20] et CASSIE[10] sont très importants. Ces deux auteurs font une série de suppositions pour aboutir à une expression mathématique représentant le comportement de l'arc en régime dynamique.

Pour présenter correctement le comportement de l'arc en régime dynamique, l'équation du modèle de l'arc doit être présentée sous la forme:

$$\frac{1}{R} = F\,[W, N, t] \qquad (11)$$

Où:

. R = Résistance instantanée d'arc par unité de longueur (e/i)
. W = Puissance dissipée dans l'arc par unité de longueur (e.i)
. N = Puissance évacuée par unité de longueur
. t = Temps

C'est-à-dire que la résistance de l'arc est fonction de la puissance dans l'arc, de la puissance évacuée et du temps.

Ou plus directement, on peut écrire:

$$\frac{1}{R} = F(Q) = F\left[\int (W - N)\, dt\right] \qquad (12)$$

Où :

Q = Energie accumulée dans l'arc

En dérivant l'équation (12) et en divisant cette nouvelle équation par (12), nous obtenons:

$$R \frac{d}{dt}\left(\frac{1}{R}\right) = \frac{F'(Q)}{F(Q)} \frac{dQ}{dt}$$

$$= \frac{F'(Q)}{F(Q)} (W - N) \qquad (13)$$

ou

$$\frac{1}{i}\frac{di}{dt} - \frac{1}{e}\frac{de}{dt} = \frac{F'(Q)}{F(Q)} (ei - N) \qquad (14)$$

Cette équation sert de base fondamentale pour développer le modèle mathématique de l'arc

La forme spécifique de l'équation finale dépendra de la valeur et de la forme choisies pour F(Q) et N.

Il serait trop long pour nous d'expliquer en détail la dérivation des modèles mathématiques de l'arc obtenus par MAYR et CASSIE. Toutefois, il nous paraît nécessaire de donner des hypothèses faites par ces deux auteurs pour développer le modèle mathématique de l'arc.

MAYR présente la colonne d'arc comme un cylindre de rayon constant et dans lequel la température varie avec la distance radiale et le temps. La puissance évacuée est supposée constante. La dissipation de la chaleur se fait uniquement par conduction. L'ionisation est supposée être faite par l'effet thermique.

Quant à CASSIE[10] il suppose une colonne d'arc dans laquelle la température est constante et uniforme en espace et en temps, et dont la section varie avec le courant. L'évacuation de chaleur est supposée être faite par convection.

Le domaine d'application et la validité du modèle mathématique ont été longuement discutés dans les articles publiés par MAYR, CASSIE, BROWNE[4] et RIEDER[28].

Le modèle mathématique de l'arc présenté par CASSIE décrit au mieux le comportement de l'arc observé avant le dernier passage au zéro du courant[4].

Après le courant zéro, la tension appliquée est déterminée essentiellement par le circuit connecté, et le modèle de MAYR s'adapte mieux au comportement de l'arc observé.

En réalité les deux théories, qui permettent de tenir compte de l'inertie thermique de l'arc, conduisent à des comportements de l'arc très comparables autour du zéro de courant. Le modèle de MAYR possède, en outre, l'avantage de mieux représenter le comportement statique de l'arc.

Dans l'étude analytique du phénomène post-arc, nous allons utiliser la théorie présentée par MAYR.

3.5. conductibilité électrique de l'arc

La conductibilité électrique de la colonne d'arc est une conséquence de la dissociation, quand la température est élevée, des molécules gazeuses jusqu'ici neutres en électrons et en ions positifs. Ce phénomène est représenté mathématiquement par la formule de SAHA[30] sur la thermoionisation.

$$x = 5{,}6 \cdot 10^{-4} \frac{T^{1,25}}{\sqrt{p}} e^{-\frac{5850\ eV_i}{T}} \qquad (15)$$

Où:

. x = degré d'ionisation

. T = la température absolue (°K)

. p = la pression (atm)

. ev_i = le travail d'ionisation (ev_i)

Il convient de remarquer que l'exactitude de cette formule est fortement influencée par l'incertitude de ev_i. Nous allons nous limiter à tirer de cette formule la relation fonctionnelle entre le degré d'ionisation et la température.

Nous avons en outre:

. e : la charge élémentaire

. b : la mobilité des électrons

. N : le nombre de molécules par unité de volume

La conductibilité électrique spécifique k du gaz entre deux contacts est alors

$$k = e.b.N.x \qquad (16)$$

avec $$b = 7{,}05 \cdot 10^4 \frac{\lambda_o}{p} \sqrt{T}$$

et $$N = 2{,}70 \cdot 10^{19}\, p\, \frac{273}{T}$$

où λ_o = libre parcours moyen de la molécule de gaz
avec p = 1 torr à T = 273 °K. La formule (16) devient :

$$k = 4{,}74 \cdot 10^4 \frac{\lambda_o}{\sqrt{p}}\, T^{0,75}\, e^{-\frac{5850\ eV_i}{T}} \qquad (17)$$

Si $\mathfrak{E}$ est l'intensité du champ électrique en direction de l'axe, nous avons pour la densité du courant:

$$/i/ = k\ /\mathfrak{E}/$$

et pour la puissance thermique par unité de volume:

$$/\mathfrak{E}/ \cdot /i/ = k\ /\mathfrak{E}/^2 \qquad (18)$$

L'énergie libérée dans l'arc se dissipe en partie sous forme de rayonnement et en partie par la conduction du gaz. Au voisinage du zéro de courant, les pertes par rayonnement sont négligeables comparativement à la conduction thermique. On va donc prendre uniquement les pertes par conduction dans le développement du calcul qui suit.

La capacité calorifique de la colonne d'arc et sa corrélation avec conductibilité électrique

La chaleur Q accumulée dans l'arc est une valeur thermique qui peut se formuler électriquement et de manière simple comme étant la différence entre toute l'énergie reçue et celle evacuée.

Nous avons pour la puissance, c'est-à-dire pour le quotient différentiel $\frac{dQ}{dt}$ de toute la chaleur accumulée dans le volume d'arc, la relation:

$$\frac{dQ}{dt} = /\mathfrak{E}/ \cdot I - N_o \qquad (19)$$

Dans cette relation $/\mathfrak{E}/ \cdot I$ est la valeur momentanée de la puissance que l'arc reçoit du

circuit électrique.

N_o est la puissance évacuée par cet arc à la paroi du cylindre qui le limite. En ce qui concerne l'arc statique on a:

$$/\mathcal{E}/ \cdot I = N_o \qquad (20)$$

D'après MAYR la chaleur évacuée par le volume d'arc reste constante, cela signifie que les variations de températures sont limitées à l'arc et à son voisinage immédiat.

Afin de mettre la relation (19) sous forme d'équation différentielle soluble, il est nécessaire de trouver encore une autre relation entre la nouvelle variable Q et les deux valeurs électriques $\mathcal{E}$ et I. Nous allons chercher cette relation dans l'interdépendance de Q et de la conductibilité électrique de la colonne d'arc.

Si T_1 est la température ambiante, chaque unité de volume d'un élément d'arc reçoit par la température T une quantité de chaleur:

$$q = S \cdot C_p \, (T - T_1) \qquad (21)$$

Dans cette équation, S est la densité du milieu gazeux à la température T et C_p sa capacité calorifique sous pression constante.

Les formules bien connues de la théorie des gaz nous donnent les valeurs suivantes rapportées à la température T.

	$S \cdot C_p$	$q = S.C_p \, (T - T_1)$	q_0
gaz monoatomiques	$0{,}253 \frac{P}{T}$	$0{,}253 \; p \; (1 - \frac{T_1}{T})$	$4{,}33.10^{-5} \frac{pT_1}{eV_i}$
gaz biatomiques	$0{,}354 \frac{P}{T}$	$0{,}354 \; p \; (1 - \frac{T_1}{T})$	$6{,}05.10^{-5} \frac{pT_1}{eV_i}$

Etudions maintenant la dépendance de la conductibilité électrique k de l'énergie q. Dans l'équation (17), l'exposant a une influence prépondérante tellement grande qu'en première approximation on peut écrire:

$$k = \text{Const.} \; e^{-\frac{\alpha}{T}} \qquad (22)$$

Eliminons T d'après le tableau ci-dessus et faisons apparaître q, nous obtenons après transformation simple:

$$k = \text{Const.} \; e^{-\frac{q}{q_o}} \qquad (23)$$

La capacité calorifique de tout le volume d'arc de rayon r et de longueur unité, est:

$$Q = 2\,\pi \int_0^r q.\,r.\,dr \tag{24}$$

La conductibilité est égale à $\frac{1}{R} = \frac{I}{/\mathfrak{E}/}$ (25)

Donc, en ce qui concerne la résistance électrique par unité de longueur, nous obtenons la relation importante:

$$R = \text{Const.}\, e^{-\frac{Q}{Q_0}} \tag{26}$$

La résistance d'arc est donc une fonction exponentielle de la capacité calorifique de la colonne d'arc.

Dans l'équation (19), nous pouvons déjà remplacer au moyen de l'équation (26) la variable thermique Q par les variables électriques $/\mathfrak{E}/$ et I

$$\frac{dR}{dt} = \text{Const.}\,(-\frac{1}{Q_0}\,\frac{dQ}{dt})\,e^{-\frac{Q}{Q_0}} \tag{27}$$

En divisant (27) par (26)

$$\frac{1}{R}\,\frac{dR}{dt} = -\,\frac{dQ}{dt}\,\frac{1}{Q_0}$$

donc

$$\frac{dQ}{dt} = -\,\frac{Q_0}{R}\,\frac{dR}{dt} \tag{28}$$

En remplaçant R par $\frac{\mathfrak{E}}{I}$, nous obtenons :

$$\frac{dQ}{dt} = Q_0[\frac{1}{I}\,\frac{dI}{dt} - \frac{1}{\mathfrak{E}}\,\frac{d\mathfrak{E}}{dt}] \tag{29}$$

En introduisant ce résultat dans l'équation (19) nous obtenons ainsi l'équation différentielle de l'arc dynamique sous la forme plus générale :

$$Qo\,[\,\frac{1}{I}\,\frac{dI}{dt} - \frac{1}{\mathfrak{E}}\,\frac{d\,\mathfrak{E}}{dt}\,] = /\mathfrak{E}/.\,I - No \tag{30}$$

Cette équation différentielle non linéaire contient encore les deux inconnues $\mathfrak{E}$ et I. C'est pourquoi pour la résoudre, il nous faut une deuxième relation entre les deux inconnues. Cette relation résulte pratiquement de la caractéristique du reste du circuit.

Supposons que la caractéristique du reste du circuit est telle, qu'il est imposé à l'arc un courant constant déterminé $I = f(t)$.

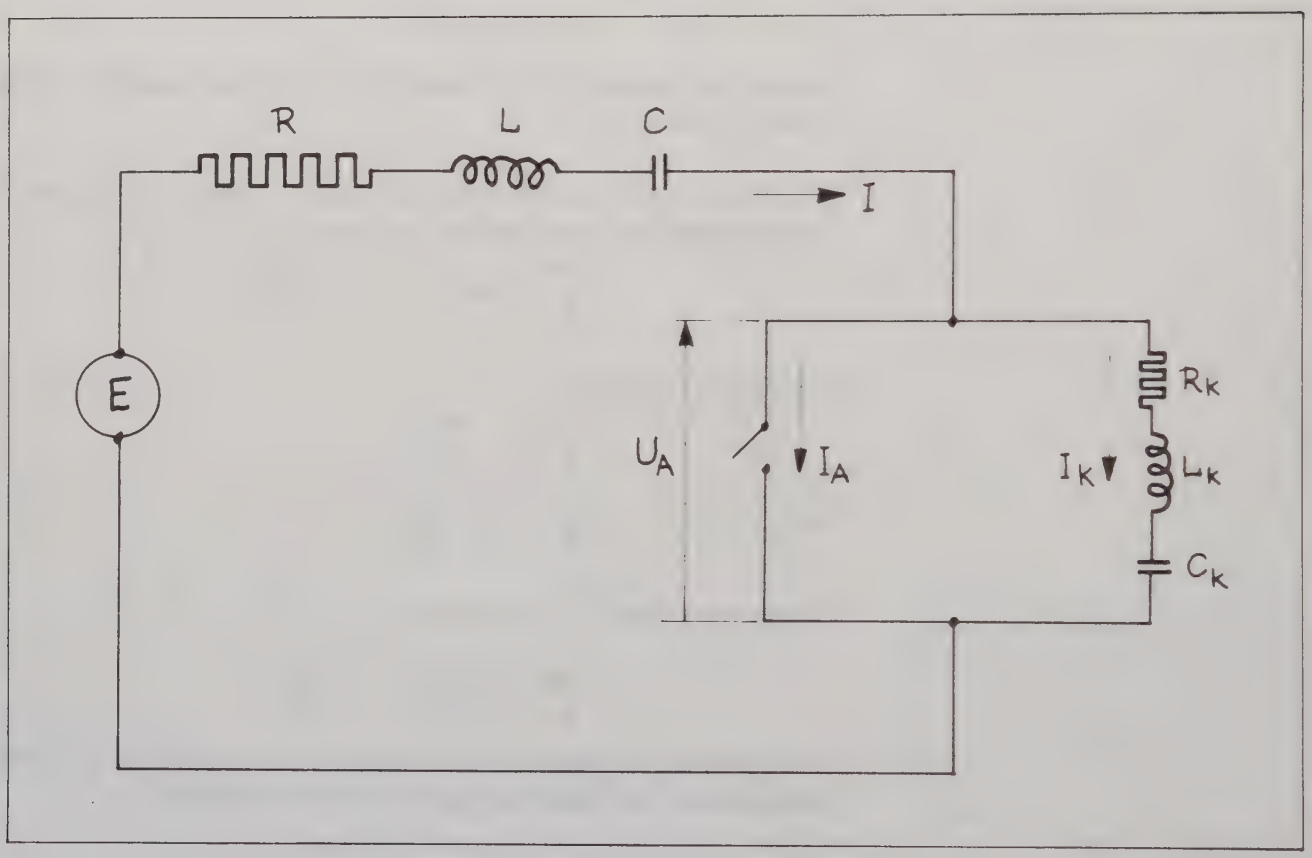


Fig. 3.2. - Schéma du circuit d'essais

Pour $I = f(t)$ et $/\&/ = Rf(t)$ l'équation (30) prend la forme suivante:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{1}{R}\right) + \frac{N_o}{Q_0}\frac{1}{R} = \frac{1}{Q_0} f^2 \ (t) \tag{31}$$

On va utiliser à la place de Q_0 dans tout ce qui suit la constante:

$$\theta = \frac{Q_0}{N_0} \tag{32}$$

Cette constante a la dimension d'un temps et sera appelée «constante de temps» de l'arc. Physiquement défini θ est le temps pendant lequel la puissance No de l'arc devrait affluer dans l'accumulateur thermique de l'arc pour augmenter la conductibilité dans le rapport 1:e

Nous pouvons écrire l'équation (31) sous la forme:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{1}{R}\right) + \frac{1}{\theta}\frac{1}{R} = \frac{1}{N_0\theta} \ f^2 \ (t) \tag{33}$$

En supposant $i = i(t)$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{1}{R}\right) + \frac{1}{\theta}\frac{1}{R} = \frac{1}{N_0\theta} \ i^2 \ (t) \tag{34}$$

Cette équation est linéaire.
Nous obtenons par intégration de l'équation (34) la solution générale:

$$\frac{1}{R} = e^{-t/\theta}\left[\frac{1}{R_o} + \frac{1}{N_o\theta}\int_o^t i^2 \ (t)\ e^{t/\theta}\, dt\right] \tag{35}$$

avec la condition limite $R = R_0$ pour $t = 0$

3.6. calcul des courants post-arc

Nous allons essayer de calculer le courant post-arc dans un disjoncteur placé dans un circuit donné. Nous allons utiliser le modèle mathématique de l'arc que nous venons de developper.

Pour étudier l'influence des divers paramètres du circuit, nous allons prendre un circuit plus général; ceci nous permettra d'étudier toutes les possibilités.
Le circuit en considération est indiqué en Fig. 3.2.
On va calculer la variation de la résistance de l'arc, le courant d'arc et la tension d'arc avant et après l'extinction de celui-ci.

On peut écrire les équations suivantes:

$$E = L\frac{dI}{dt} + RI + V + U_A \tag{36}$$

V – tension aux bornes du condensateur C
U_A – tension d'arc
I – courant dans le circuit principal

$$U_A = R_K I_K + L_K \frac{dI_K}{dt} + V_K \tag{37}$$

V_k – tension aux bornes de capacité C_K

$$U_A = R_A I_A + e \tag{38}$$

$$I = I_A + I_K \tag{39}$$

I_A – courant d'arc
e – chute de tension dans les contacts
I_K – courant dans le circuit parallèle avec l'arc

$$V = \frac{1}{C}\int I dt \tag{40}$$

$$V_K = \frac{1}{C_k}\int I_K dt \tag{41}$$

$$\frac{1}{R_A} = \left[\frac{1}{R_0} + \frac{1}{N_0\theta}\int I_A^2 \; e^{t/\theta}\, dt\right] e^{-t/\theta} \tag{42}$$

L'intégration des équations différentielles du circuit et la résolution du système s'obtiennent en linéarisant des équations entre un instant t et un instant $t+\tau$ (τ : pas de calcul).

Un programme a été mis au point pour calculer le courant post-arc à partir de ces équations. Le programme final a été réalisé en collaboration avec l'équipe du département Recherches Générales de MERLIN GERIN.

Les paramètres du circuit utilisés dans le programme sont les suivants:

$L = 0{,}125 \cdot 10^{-2}$ H
$R = 0{,}15\ \Omega$
$\frac{1}{C} = 0$
$R_K = 0$
$L_K = 0$
l = longueur de l'arc = 2 cm

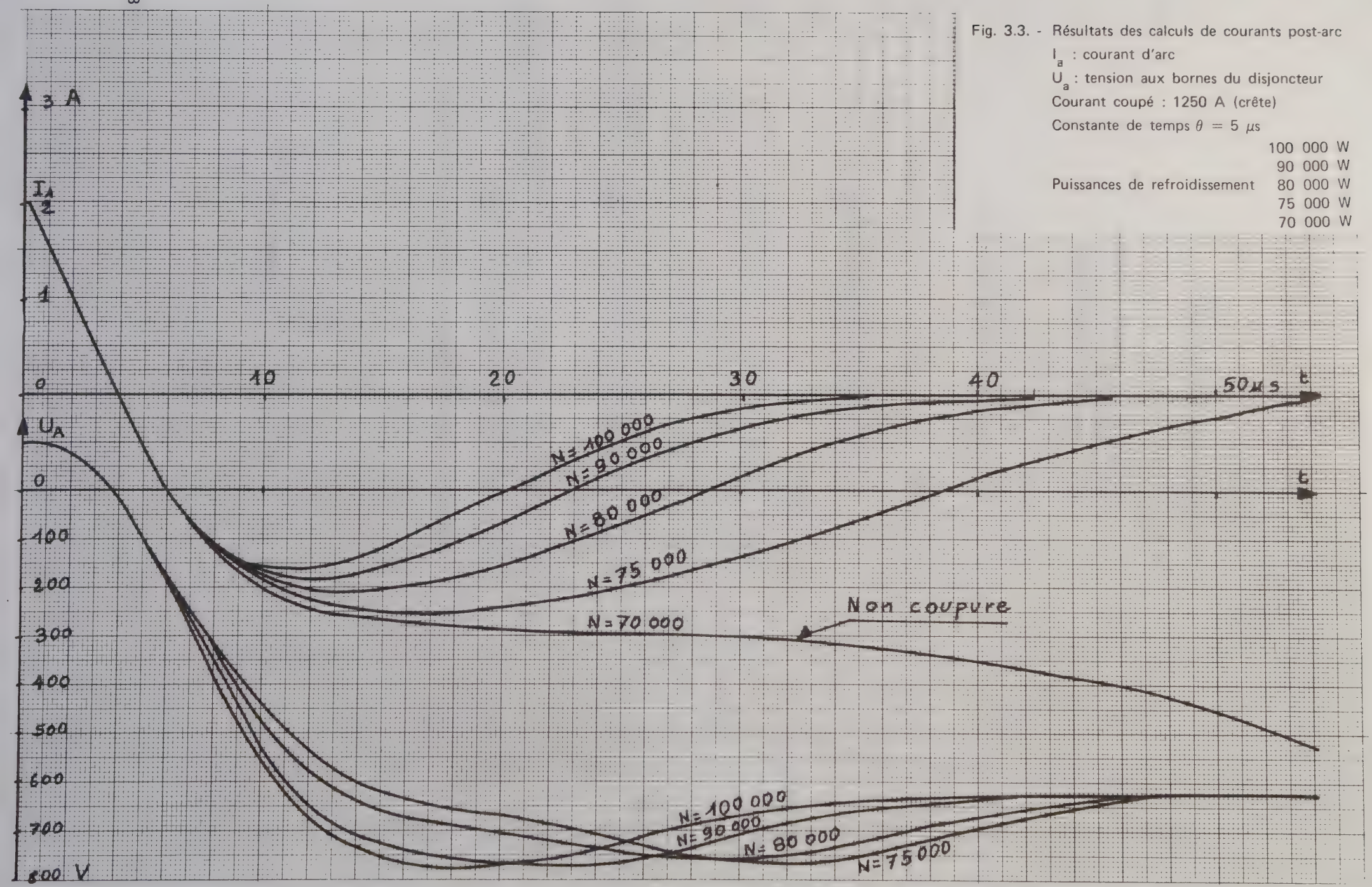


Fig. 3.3. - Résultats des calculs de courants post-arc

I_a : courant d'arc

U_a : tension aux bornes du disjoncteur

Courant coupé : 1250 A (crête)

Constante de temps $\theta = 5\ \mu s$

Puissances de refroidissement : 100 000 W, 90 000 W, 80 000 W, 75 000 W, 70 000 W

LES PAPIERS CANSON - FRANCE

Les contacts sont shuntés par une capacité de très faible valeur $C_k = 1.10^{-9}$ F (telle que la tension de rétablissement obtenue soit comparable en fréquence aux valeurs expérimentales).

Les essais ont été faits pour trois constantes de temps différentes $\theta = 5$, 10 et 12 μs et, pour chacune de ces valeurs, nous avons pris diverses valeurs de puissance de refroidissement. Les résultats sont indiqués dans les figures 3.3 à 3.9.

Discussion des résultats de calculs

La figure 3.3 indique la présence d'un courant post-arc de 1,8 A pour un courant coupé de 1250 A (crête) et pour la puissance de refroidissemement N = 100 000 W et $\theta = 5$ μs. La durée du courant post-arc est 31 μs. La tension d'alimentation est 620 V (crête). Si l'on diminue la puissance de refroidissement N à 75 000 W le courant post-arc augmente à 2,3 A et sa durée est 50 μs.

La diminution de N à 70 000 W provoque une non-coupure pour le même courant à couper.

La figure 3.4 montre les résultats obtenus avec $\theta = 10\mu$s. Le courant à couper a la même valeur (1250 A crête) que dans le cas précédent. On obtient un courant post-arc de 3,8 A et sa durée est de 80 μs. La puissance de refroidissement N a une valeur de 160 000 W. L'amplitude et la durée du courant post-arc changent avec la puissance de refroidissement.

La figure 3.5 représente les résultats obtenus avec $\theta = 12\mu$s et pour diverses valeurs de N.

La figure 3.6 indique l'influence du courant coupé sur l'amplitude et la durée du courant post-arc. On constate que pour $\theta = 5\mu$s, N = 80 000 W, et un courant à couper 1000 A (crête), le courant post-arc a une amplitude de 1,5 A et une durée de 30 μs. Le courant post-arc augmente avec le courant à couper. Pour 1250 A le courant post-arc a une amplitude de 2 A et une durée de 42 μs. Si l'on augmente le courant jusqu'à 1500 A, le courant post-arc dégénère en courant principal. C'est une non coupure.

La figure 3.7 indique la variation de résistance de l'arc pour les trois valeurs différentes de courant à couper correspondant au cas précédents.

Les figures 3.8 et 3.9 montrent la variation de résistance de l'arc pour les cas considérés dans les figures 3.3 et 3.4 respectivement.

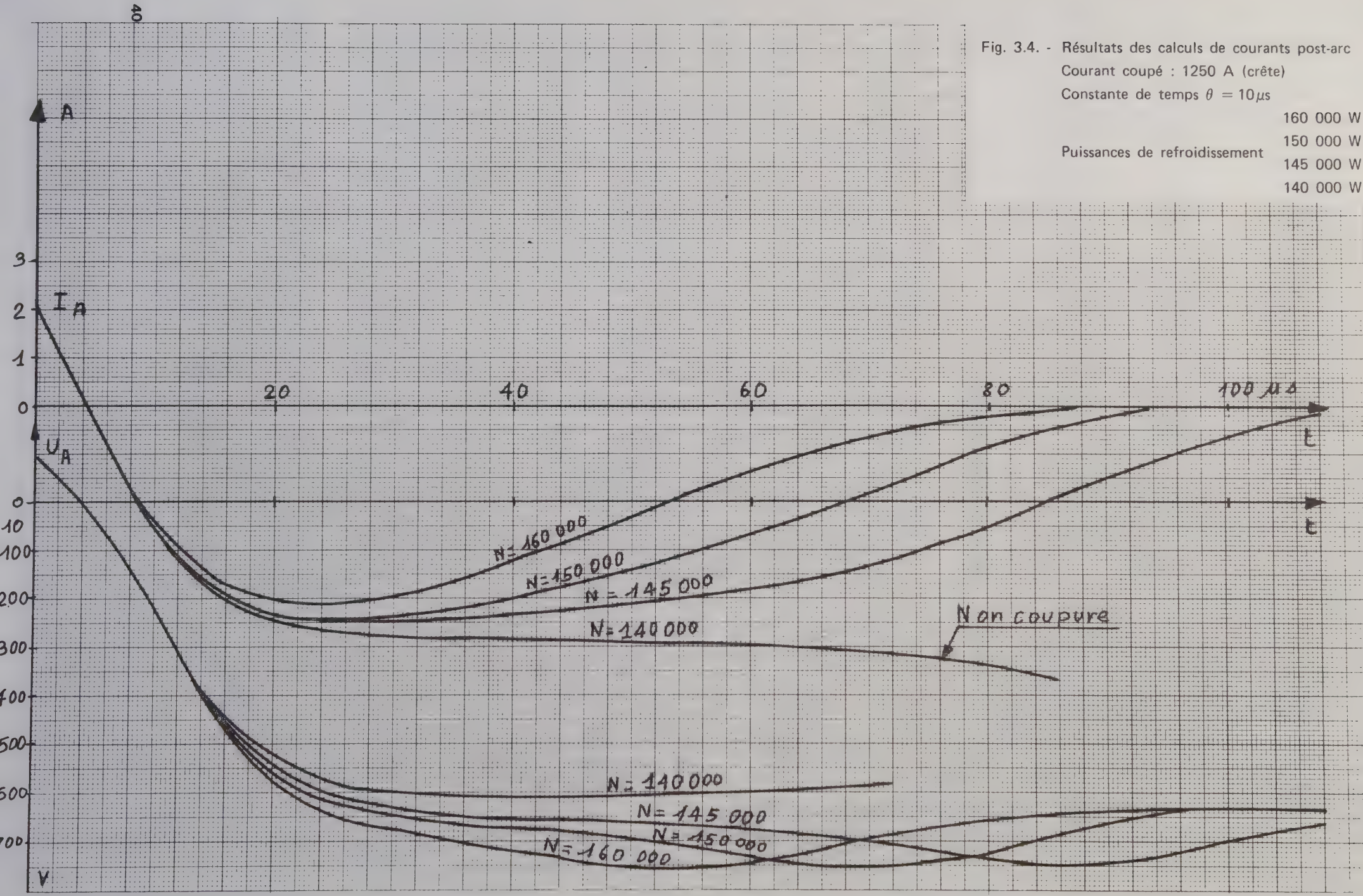


Fig. 3.4. - Résultats des calculs de courants post-arc
Courant coupé : 1250 A (crête)
Constante de temps $\theta = 10\mu s$

Puissances de refroidissement
160 000 W
150 000 W
145 000 W
140 000 W

LES PAPIERS CANSON - FRANCE

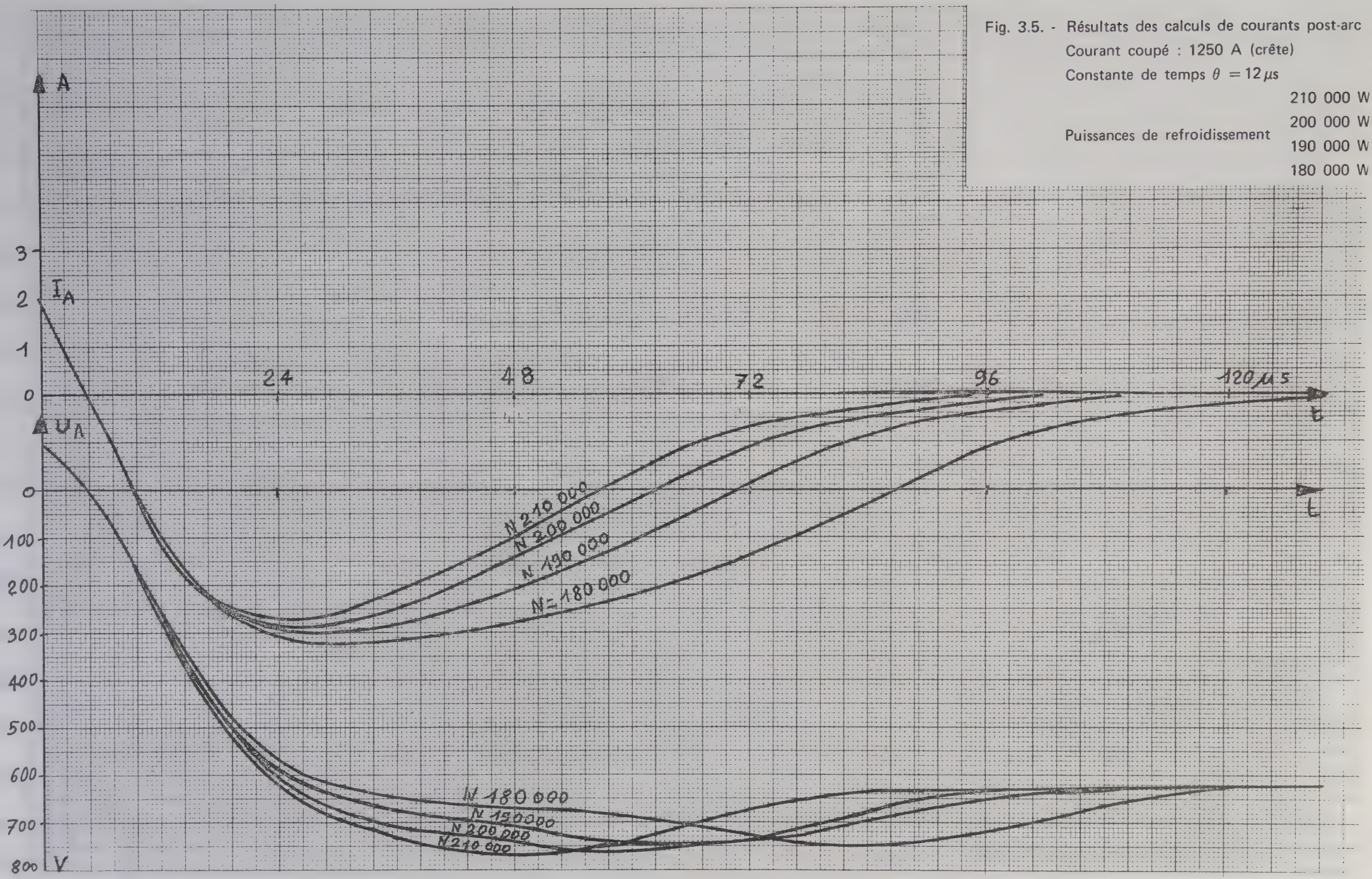


Fig. 3.5. - Résultats des calculs de courants post-arc
Courant coupé : 1250 A (crête)
Constante de temps $\theta = 12\,\mu s$

Puissances de refroidissement
210 000 W
200 000 W
190 000 W
180 000 W

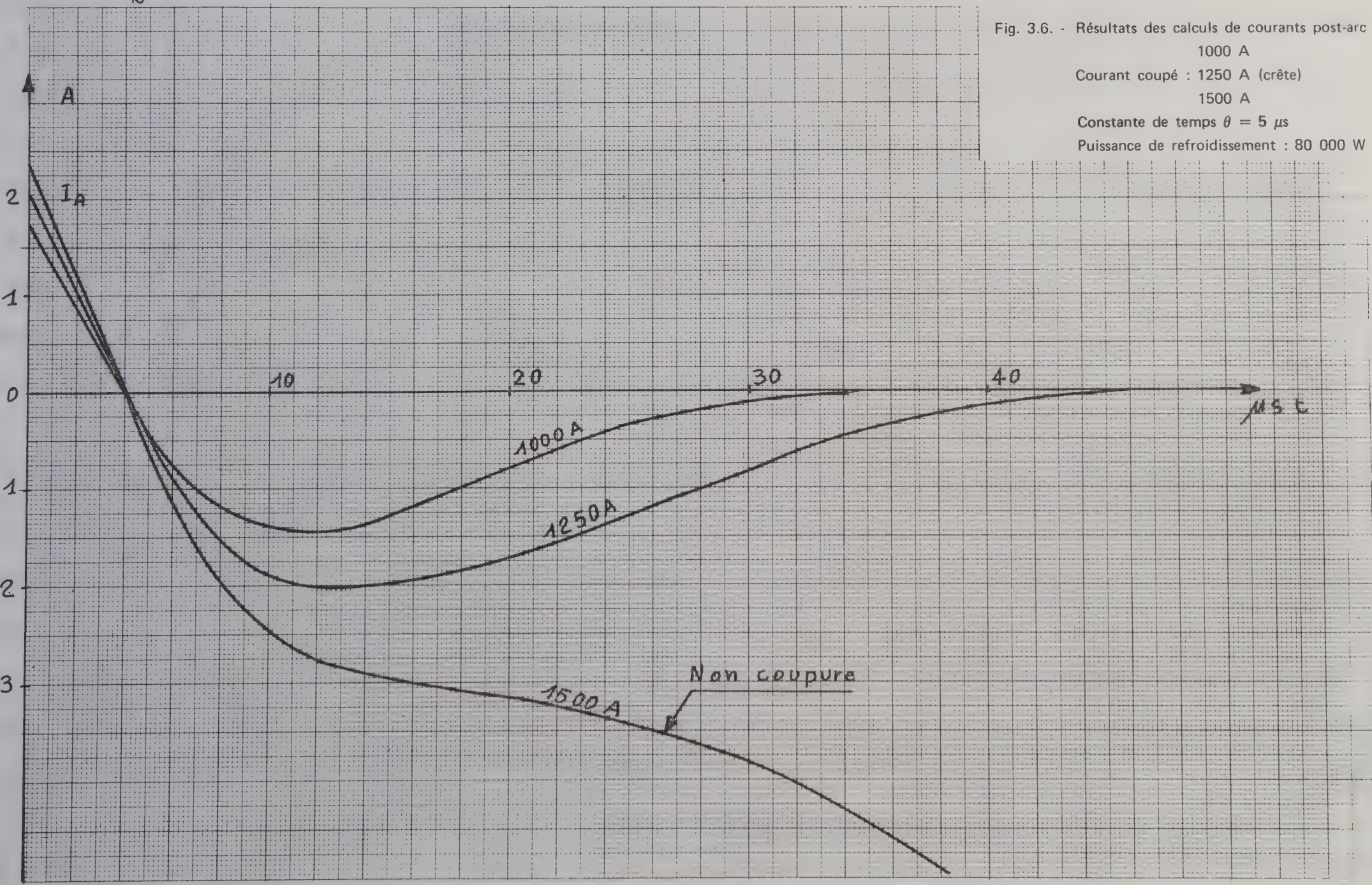


Fig. 3.6. - Résultats des calculs de courants post-arc

1000 A

Courant coupé : 1250 A (crête)

1500 A

Constante de temps $\theta = 5\ \mu s$

Puissance de refroidissement : 80 000 W

LES PAPIERS CANSON - FRANCE

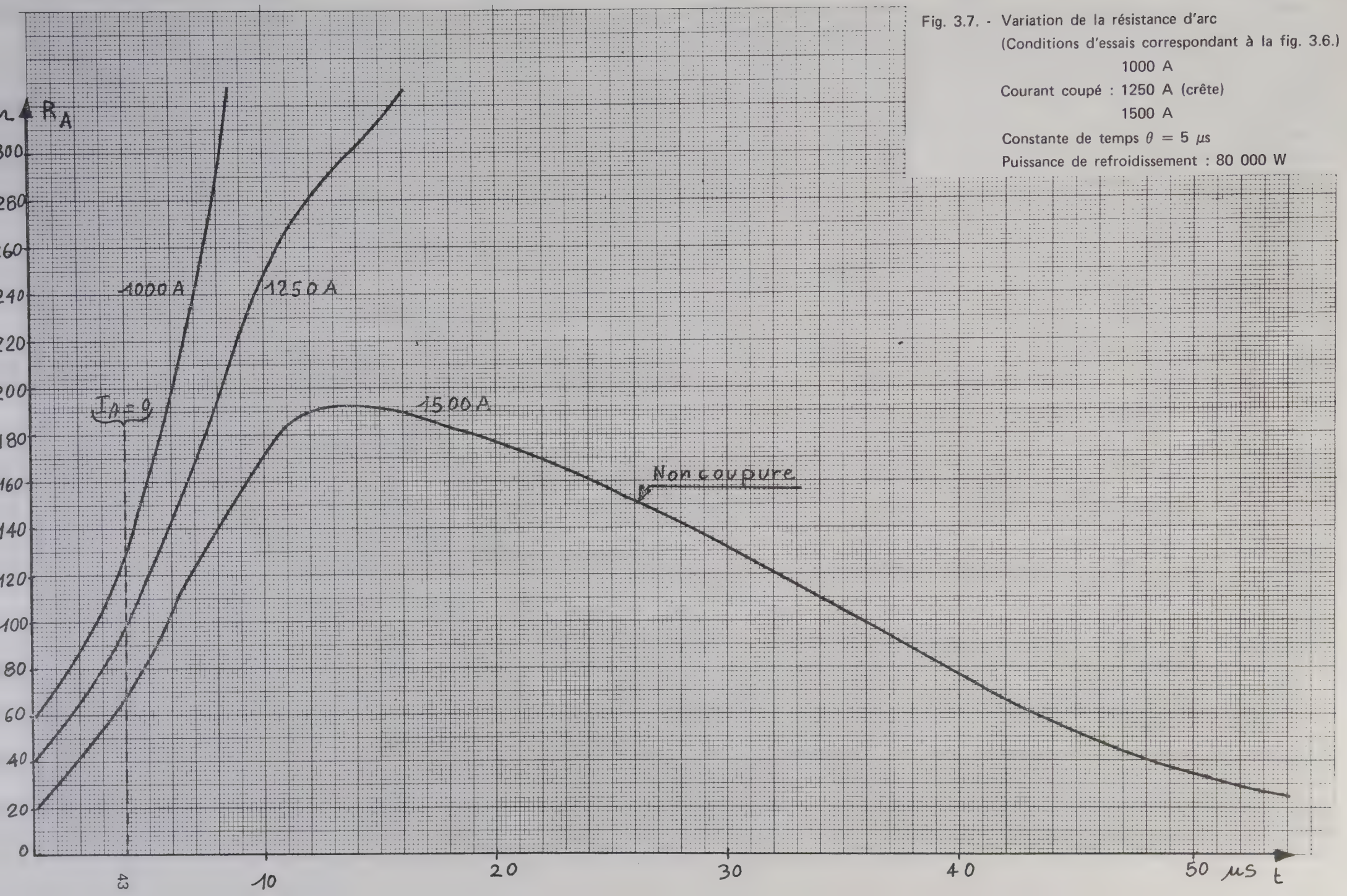


Fig. 3.7. - Variation de la résistance d'arc
(Conditions d'essais correspondant à la fig. 3.6.)
1000 A
Courant coupé : 1250 A (crête)
1500 A
Constante de temps $\theta = 5\ \mu s$
Puissance de refroidissement : 80 000 W

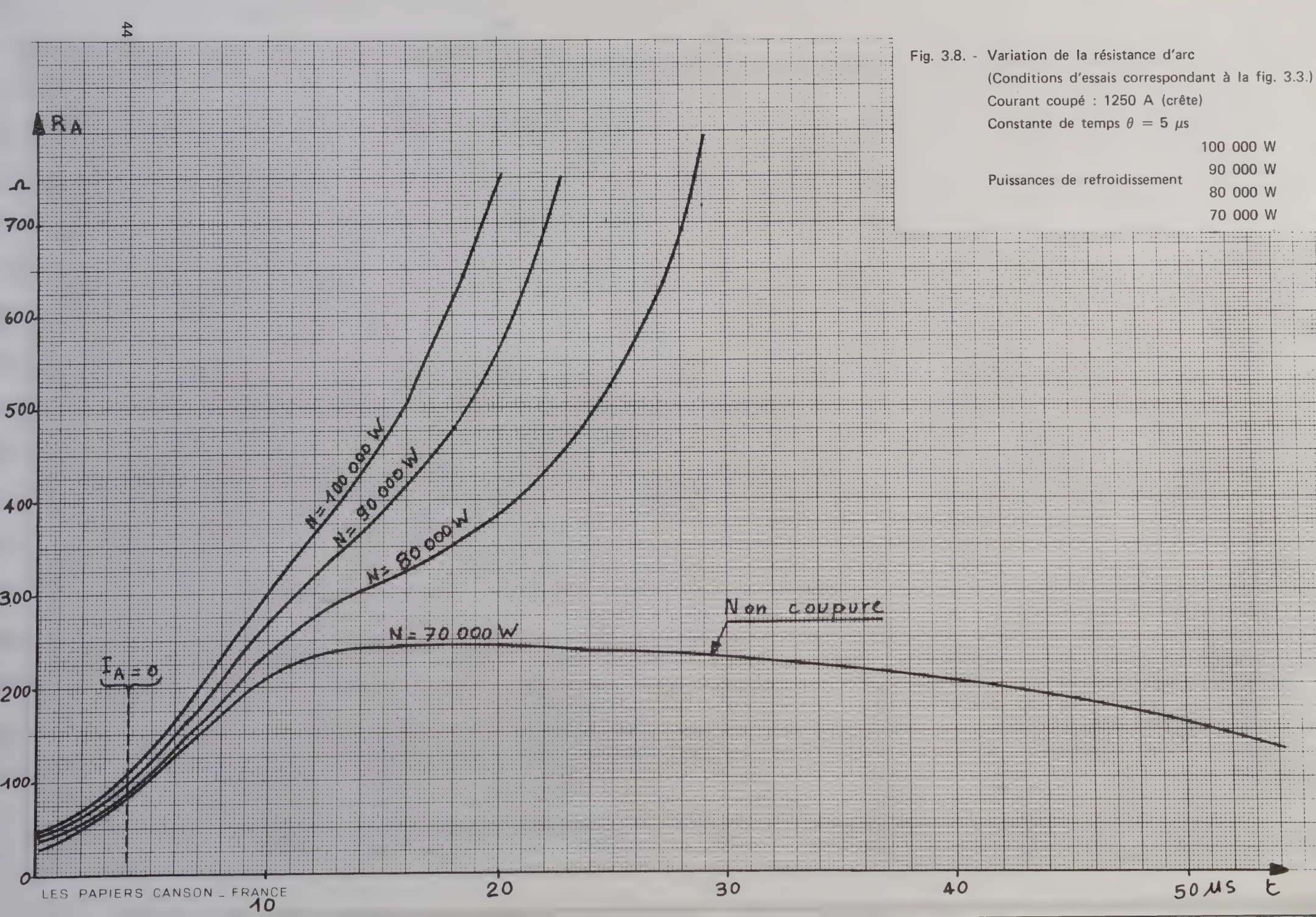


Fig. 3.8. - Variation de la résistance d'arc
(Conditions d'essais correspondant à la fig. 3.3.)
Courant coupé : 1250 A (crête)
Constante de temps $\theta = 5\ \mu s$

Puissances de refroidissement	100 000 W
	90 000 W
	80 000 W
	70 000 W

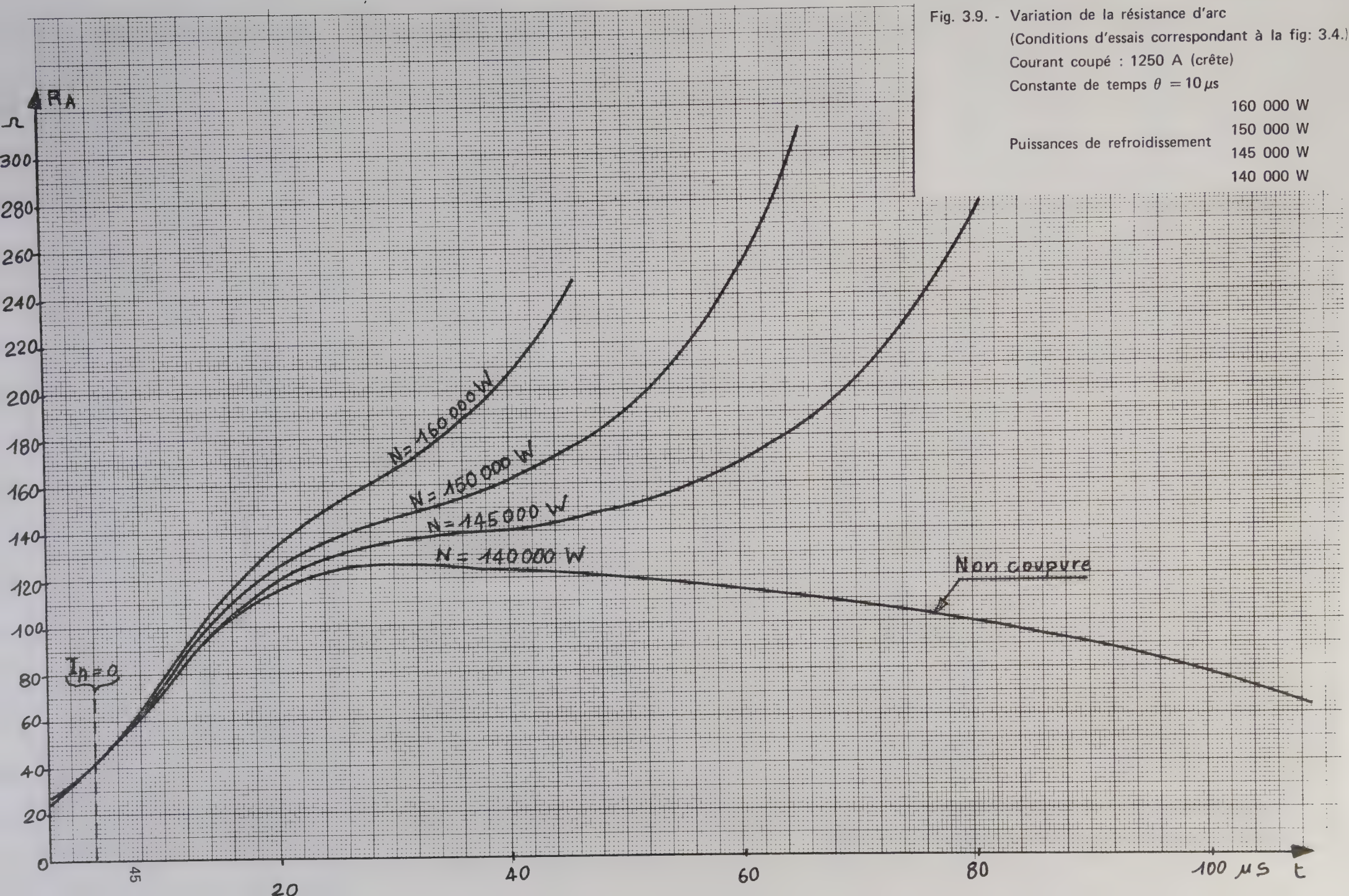


Fig. 3.9. - Variation de la résistance d'arc
(Conditions d'essais correspondant à la fig: 3.4.)
Courant coupé : 1250 A (crête)
Constante de temps $\theta = 10\,\mu s$

Puissances de refroidissement
160 000 W
150 000 W
145 000 W
140 000 W

4. MESURE DES COURANTS POST-ARC

4.1. problème de mesure des courants post-arc

4.1.1. importance du problème

Les mesures des courants post-arc dans les disjoncteurs présentent un grand intérêt puisque la réussite d'une coupure dépend du comportement de ce milieu post-arc.

Ces recherches pourraient apporter d'intéressants résultats sur l'interaction entre disjoncteurs et circuit, de même que sur le mécanisme de réallumage.

Les mesures des courants post-arc sont très délicates et difficiles pour les raisons suivantes:

. amplitude du courant post-arc
L'amplitude du courant post-arc peut varier entre une valeur de 1 A à quelques ampères. Le courant de court circuit dans la demi-période précédant l'extinction de l'arc peut atteindre une amplitude 10^3 à 10^5 fois plus grande que le courant post-arc.

. durée du courant post-arc
La durée du courant post-arc s'évalue entre 10 à 300 μs.

4.1.2. conditions à remplir par l'appareillage de mesure

Les mesures des courants post-arc exigent de l'appareillage de mesure les caractéristiques suivantes:

. Le dispositif de mesure du courant doit présenter une capacité de surcharge très élevée. Il doit permettre le passage de courants de plusieurs dizaines de milliers d'ampères sans présenter d'impédances gênantes et sans que ses caractéristiques de fonctionnement soient perturbées; il doit ensuite enregistrer des courants de quelques ampères.

. La bande passante du dispositif de mesure doit être assez élevée (supérieure à 500 kHz).

. Le dispositif de mesure doit être rendu insensible aux parasites dus aux champs électriques et magnétiques externes.

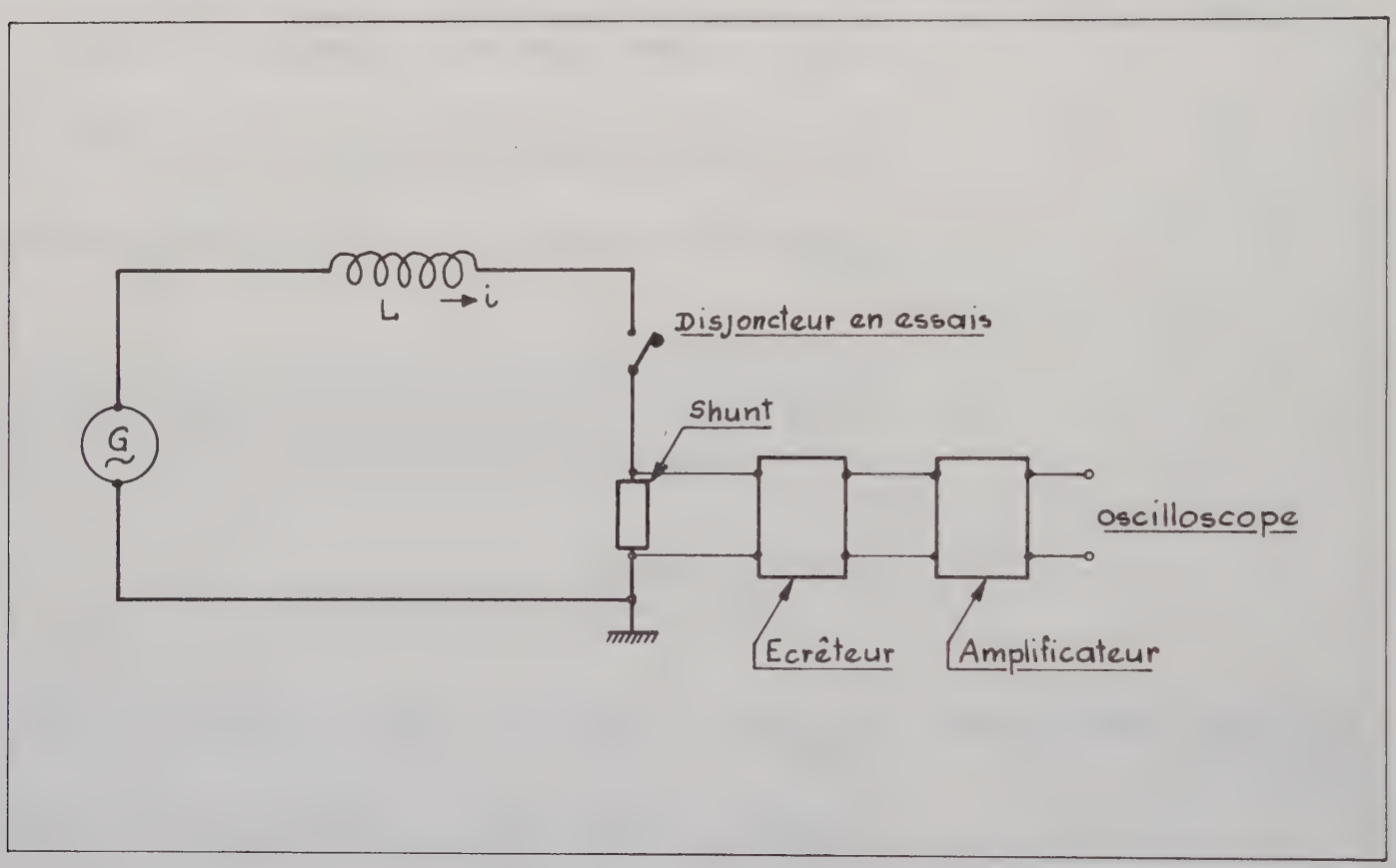


Fig. 4.1. - Mesure du courant post-arc à l'aide d'un shunt à faible résistance

Le moyen d'enregistrement doit être capable d'enregistrer les phénomènes avec une vitesse de balayage aussi élevée que possible. Ces exigences nécessitent une étude minutieuse du système de mesure et il faut prendre toute une série de dispositions particulières.

4.2. études des travaux précédents

Ces dernières années, le problème de l'existence des courants post-arc et de leur mesure a été traité par plusieurs chercheurs. Les travaux de Messieurs CASSIE, MASON[11], RIEDER, SPRUTH[34] et BALTENSPERGER[5] sont particulièrement intéressants.

4.2.1. moyens de mesure des courants post-arc

D'après les publications disponibles, il y a trois moyens bien connus pour mesurer les courants post-arc:

. à l'aide d'un shunt à faible résistance,
. à l'aide d'un magnétron,
. en utilisant un transformateur d'intensité,

Essayons de voir de plus près ces trois méthodes

1. mesure des courants post-arc à l'aide d'un shunt à faible résistance

On met un shunt à faible résistance en série avec le disjoncteur en essai. La chute de tension aux bornes du shunt, pendant le passage du courant après l'extinction de l'arc, donne la valeur du courant post-arc.

La tension aux bornes du shunt est amplifiée par un amplificateur muni d'un écrêteur pour limiter la tension à l'entrée de l'amplificateur, pendant le passage du courant principal.

Le principe de la mesure est indiqué dans la figure 4.1. Le shunt destiné à la mesure doit satisfaire les conditions suivantes:

. Le shunt doit avoir une résistance faible pour ne pas influencer les caractéristiques du circuit principal et il doit donner une tension suffisante pendant le passage du courant post-arc.
. Il doit pouvoir supporter pendant un dixième de seconde, sans modification sensible de ses propriétés, un courant de court circuit pouvant atteindre des dizaines

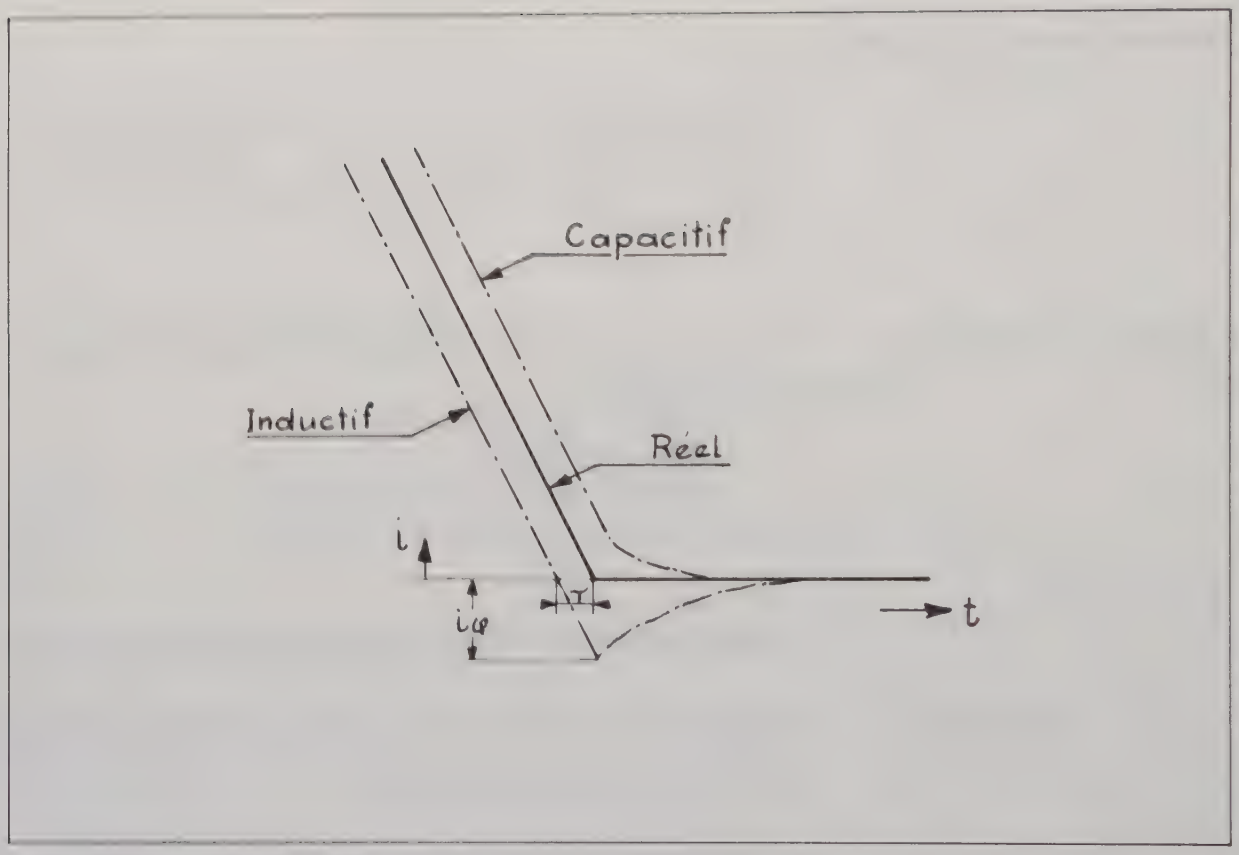


Fig. 4.2. - Enregistrement du courant avec un shunt affecté d'une constante de temps
τ : constante de temps du shunt
i_ψ : erreur de mesure au zéro du courant

de kilo-ampères.

. L'inductance propre du shunt doit être très faible afin qu'il n'y ait entre le courant et la tension aucun déphasage qui risquerait de provoquer l'enregistrement d'un courant post-arc inexistant (Fig. 4.2.).

Pour un shunt ayant une inductance propre, la tension aux bornes, qui précède le courant, s'annule, alors que circule encore un certain courant, et elle atteint, au moment du passage réel du courant par zéro, la valeur suivante:

$$i_{\psi} = \tau \left(\frac{di}{dt}\right)_{i \to o} \qquad (43)$$

Où $\tau = \frac{L}{R}$ constante de temps du shunt.

La tension évolue ensuite suivant une exponentielle vers zéro avec la constante de temps du dispositif d'enregistrement. Pour un courant sinusoïdal, l'erreur au passage par zéro est donnée par:

$$i_{\psi} = \sqrt{2}\ \omega\ I_{eff.}\ \tau \qquad (44)$$

Pour limiter l'erreur, disons à 0,1 A après un courant de court-circuit de 50 kA eff. à 50 Hz, la constante de temps τ doit être $4{,}6 \times 10^{-9}$ seconde ou L = 4,6 pH pour R = 1 mΩ

La réalisation d'un tel shunt est assez difficile et coûteuse. L'amplificateur utilisé doit avoir un facteur d'amplification suffisant et constant pour toute la gamme de fréquences propres normalement rencontrées dans les essais.

Avantages

Cette méthode est simple. La fidélité et la reproductibilité de mesure sont satisfaisantes. D'ailleurs, cette méthode a été utilisée par la plupart des expérimentateurs.

Inconvénients

. La réalisation d'un shunt précis est difficile et coûteuse.

. L'emploi d'un shunt présente le grave inconvénient de l'existence d'une liaison métallique entre le circuit du courant à mesurer et le circuit de mesures. Il est nécessaire de relier une borne du shunt à la terre pour éviter certains phénomènes pouvant troubler les mesures.

. Les parasites introduits par induction et les erreurs dues au courant de fuite sont génants.

2. mesure du courant à l'aide d'un magnétron

Le fonctionnement de ce dispositif de mesure est fondé sur le principe de déviation magnétique d'un faisceau cathodique. Le champ magnétique nécessaire pour la déviation du faisceau est créé par le courant à mesurer. Il nécessite la fabrication d'un tube cathodique spécial.

Avantages

. Les mesures réalisées sont directes.
. Il n'y a aucune liaison entre le circuit principal et le circuit de mesure.

Inconvénients

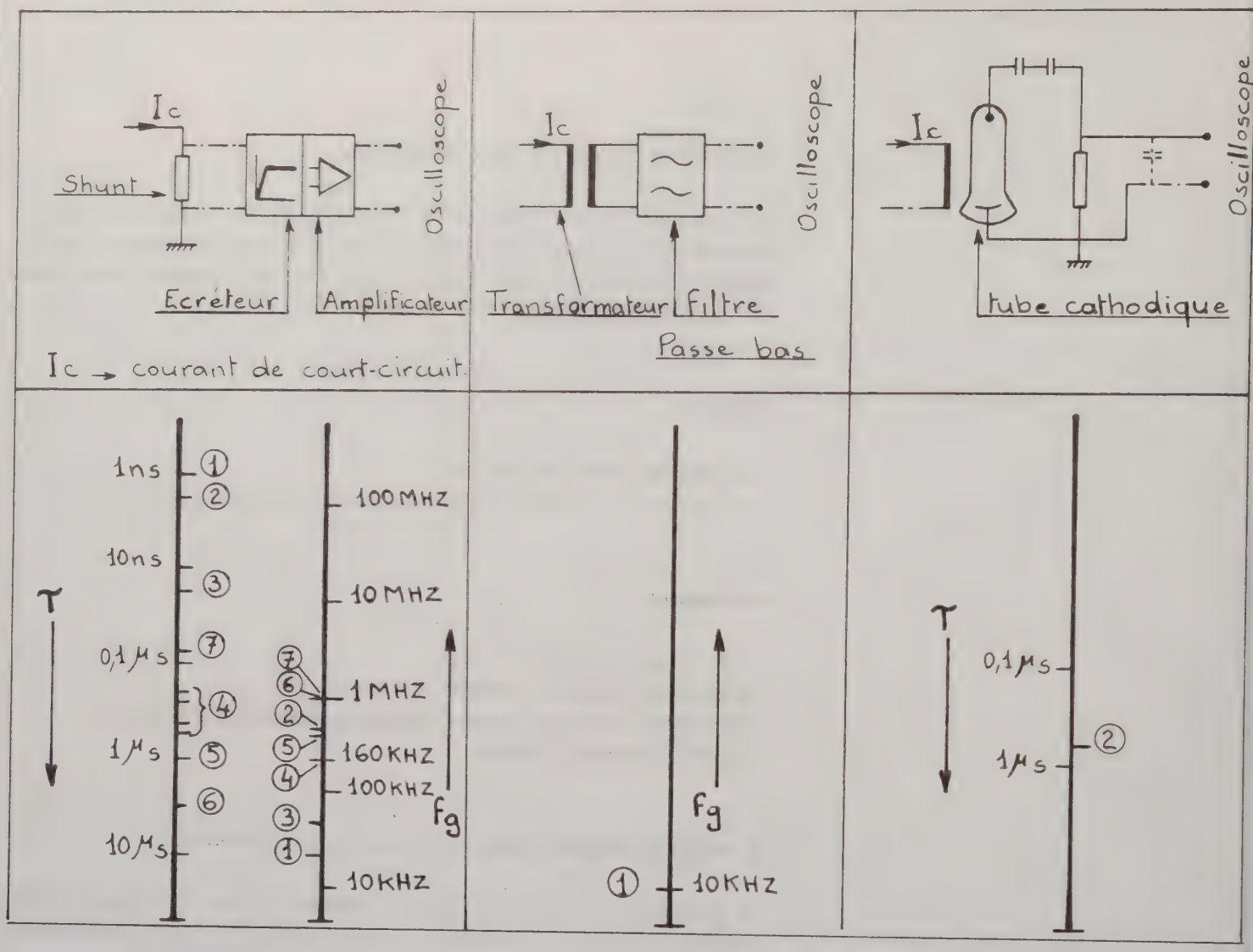
. Il est coûteux et délicat.
. Il est difficile d'obtenir la linéarité.
. Le courant à mesurer est limité si l'on veut obtenir une bonne précision.
. Il est très compliqué à réaliser.

3. mesure du courant à l'aide d'un transformateur d'intensité

La possibilité de mesurer des courants post-arc à l'aide d'un transformateur d'intensité a été évoquée par Monsieur William SPRUTH. Un tel transformateur a été spécialement aménagé dans ce but. Dans les mesures faites par ce dispositif, une dérive de zéro peut apparaître affectée de quatre constantes de temps qui dépendent des pertes dans le cuivre, de l'hystérésis, des courants de Foucault et de la fréquence propre du transformateur. Il a été démontré par l'auteur lui-même que les relevés de mesures ne sont alors utilisables qu'après la première centaine de micro-secondes qui suit le zéro du courant.

Inconvénients

. La fidélité et la précision des mesures sont très limitées.
. Les relevés de mesures ne sont valables qu'après la première centaine de micro-secondes qui suit le zéro de courant donc impossibilité de mesurer les courants post-arc de courte durée.



τ	constante de temps
fg	fréquence limite
①	Spruth [34]
②	Rieder [27]
③	Ushio [37]
④	Koplin [17]
⑤	Baltensperger [5]
⑥	Teszner [36]
⑦	Cassie [11]

Fig. 4.3. : Principaux procédés de mesure des courants post-arc

4.2.2. synthèse des appareils de mesure

Nous avons analysé la plupart des procédés de mesure décrits par les chercheurs pour mesurer les courants post-arc. Il nous a paru nécessaire de donner quelques détails pour aider à apprécier les résultats obtenus.

Ainsi, la figure 4.3. indique les principaux procédés de mesure du courant post-arc avec la constante de temps et la fréquence limite de l'appareillage.

4.2.3. erreurs de mesures

Avant de donner les résultats de mesures des courants post-arc obtenus en utilisant les moyens de mesures que nous venons de décrire, il est nécessaire d'analyser les défauts ou les erreurs de mesures qui peuvent se rencontrer au cours des mesures. Ceci nous aidera à apprécier la fidélité des résultats obtenus.

1. constante de temps du capteur de mesures

Une grande constante de temps du capteur de mesures risque de donner l'illusion de courants post-arc inéxistants spécialement dans le cas d'un shunt comme l'indique la figure 4.2..

2. dérive de zéro

La dérive de zéro, qui peut avoir plusieurs origines, est d'autant plus gênante que la constante de temps de sa variation est plus faible. Les déplacements rapides du zéro de l'oscillogramme dans la zone de 10 à 100 micro-secondes qui suit le zéro de courant peuvent simuler ou masquer des courants résiduels.

La caractéristique générale des pseudo-courants résiduels résultant d'une dérive de zéro est leur allure linéaire jusqu'à un certain maximum situé au-delà du zéro normal, sans accuser d'inflexion à l'intersection de ce zéro et leur décroissance exponentielle ensuite, non influencée par la tension transitoire de rétablissement.

3. constante de temps de l'amplificateur

Une constante de temps trop grande de l'amplificateur (bande passante trop réduite) peut masquer un coude ou une pointe de courant.

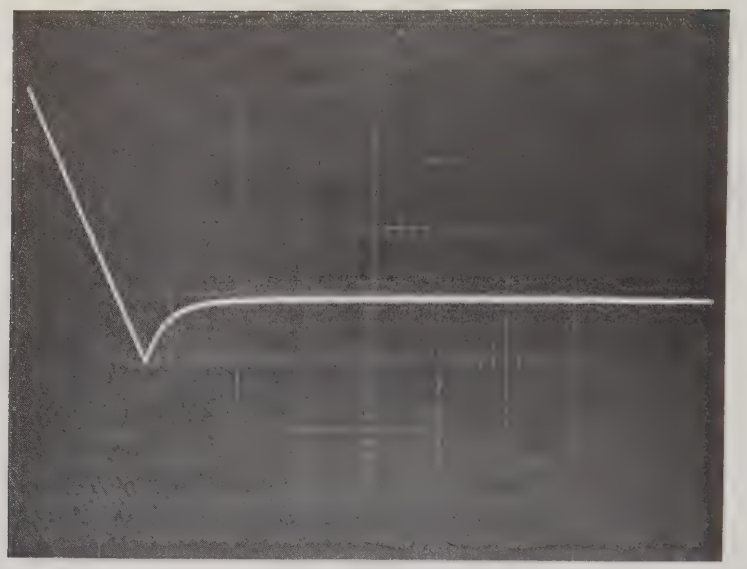


Fig. 4.4. : Mesure du courant par un shunt à faible résistance
Effet de la boucle de terre
échelle : courant : 20 A/cm
temps : 200 μs/cm
constante de temps du shunt : 1 μs
courant principal : 750. A eff.

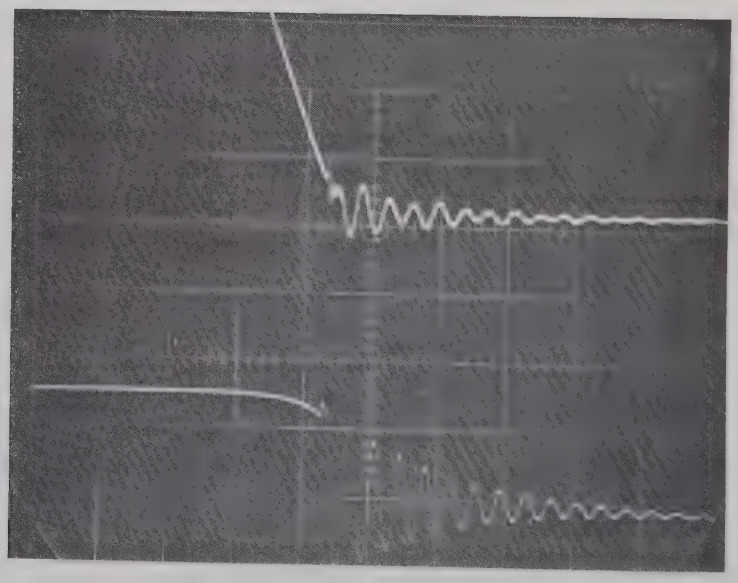


Fig. 4.5. - Mesure du courant par un shunt à faible résistance
Influence de la tension transitoire sur la mesure du courant
échelle : courant : 5 A/cm
temps : 50 μs/cm
tension : 200 V/cm

4. saturation de l'amplificateur

Un signal d'entrée trop élevé peut introduire une distorsion sous forme de déplacement de zéro. L'effet est comparable à celui d'une constante de temps trop élevée.

5. signaux parasites

Des signaux parasites peuvent agir sur le dispositif de mesures par couplage capacitif ou inductif.

Une possibilité de perturbation peut découler d'une différence de potentiel entre le réseau de terre du circuit principal et celui du circuit auxiliaire alimentant l'amplificateur et l'oscilloscope.

Les caractéristiques de mise à la terre ont une importance particulière en ce qui concerne la mesure du courant post-arc à l'aide d'une résistance.

Le châssis de l'amplificateur écrêteur ne doit pas être relié directement à la terre. Il en est de même de l'oscillographe. On mesurera alors la chute de tension correspondant à la mise en série de la résistance du shunt et de l'inductance formée par la boucle de terre.

On obtiendra ainsi des défauts de mesure identiques à ceux créés par une résistance de mesure à fort déphasage inductif. Cette erreur de mesure est illustrée dans l'oscillogramme (Fig. 4.4.) réalisé au cours des essais sur les mesures du courant par un shunt à faible résistance. Une perturbation de ce genre risque fort d'être prise pour un véritable courant résiduel. On emploie alors une précaution complémentaire pour les mesures. La mise à la terre de la boucle de court circuit se fait en un seul point. Aucune fraction de courant de court-circuit ne circule de ce fait dans les conducteurs de liaison à la terre.

Les longs câbles, qu'exige la sécurité, et l'inévitable capacité de l'appareillage de mesure par rapport à la terre forment une longue boucle sur la terre. La tension de rétablissement, à fréquence élevée, peut introduire dans cette boucle une tension parasite faisant passer un faible courant dans la gaine extérieure de câble (Fig. 4.5.). Une perturbation de ce genre risque de rendre fausse la mesure du courant post-arc. De tels pseudo-courants peuvent être reconnus d'après le critère suivant:

Un véritable courant résiduel a toujours le même signe que la tension transitoire. Au contraire, il n'est pas réel s'il paraît osciller autour de la ligne zéro à la fréquence transitoire.

Ces signaux parasites peuvent être diminués par l'emploi d'un blindage approprié de l'appareil de mesure. Le signal de mesure doit être amené par un câble bifilaire blindé parfaitement symétrique et l'amplificateur doit être compensé. Ainsi, les courants parasites sont contraints à passer dans le blindage mais pas dans la gaine extérieure du câble et ils ne peuvent pas provoquer d'interférence sur les mesures.

4.2.4. synthèse des résultats publiés

1. résultats publiés

Après avoir étudié les divers moyens de mesure des courants post-arc et les caractéristiques des appareils réalisés dans ce but, nous allons analyser les résultats obtenus en utilisant ces appareils.

Nous présentons dans la table 4.1. les résultats de mesure des courants post-arc publiés par les divers auteurs. Toutes les mesures indiquées étaient faites sur disjoncteurs pneumatiques, en utilisant la méthode du shunt à faible résistance.

No	Référence Bibliograph.	Auteur	Courant coupé kA	Tension kV	Courant post-arc A	Durée du co post-arc μs
1	27	Rieder	10,3	8,8	4	30
2	29	Rieder	8,05	8,7	10	50
3	5	Baltensperger	9,2	10	18	100
4	27	Rieder	11,5	10	100	100
5	34	Spruth	28,3	10	3	400
6	35	Teszner	15,5	22	14	620
7	8	Blase	17,7	26	25	700
8	36	Teszner	18	10	48	1000

Table 4.1. - Résultats de mesure des courants post-arc

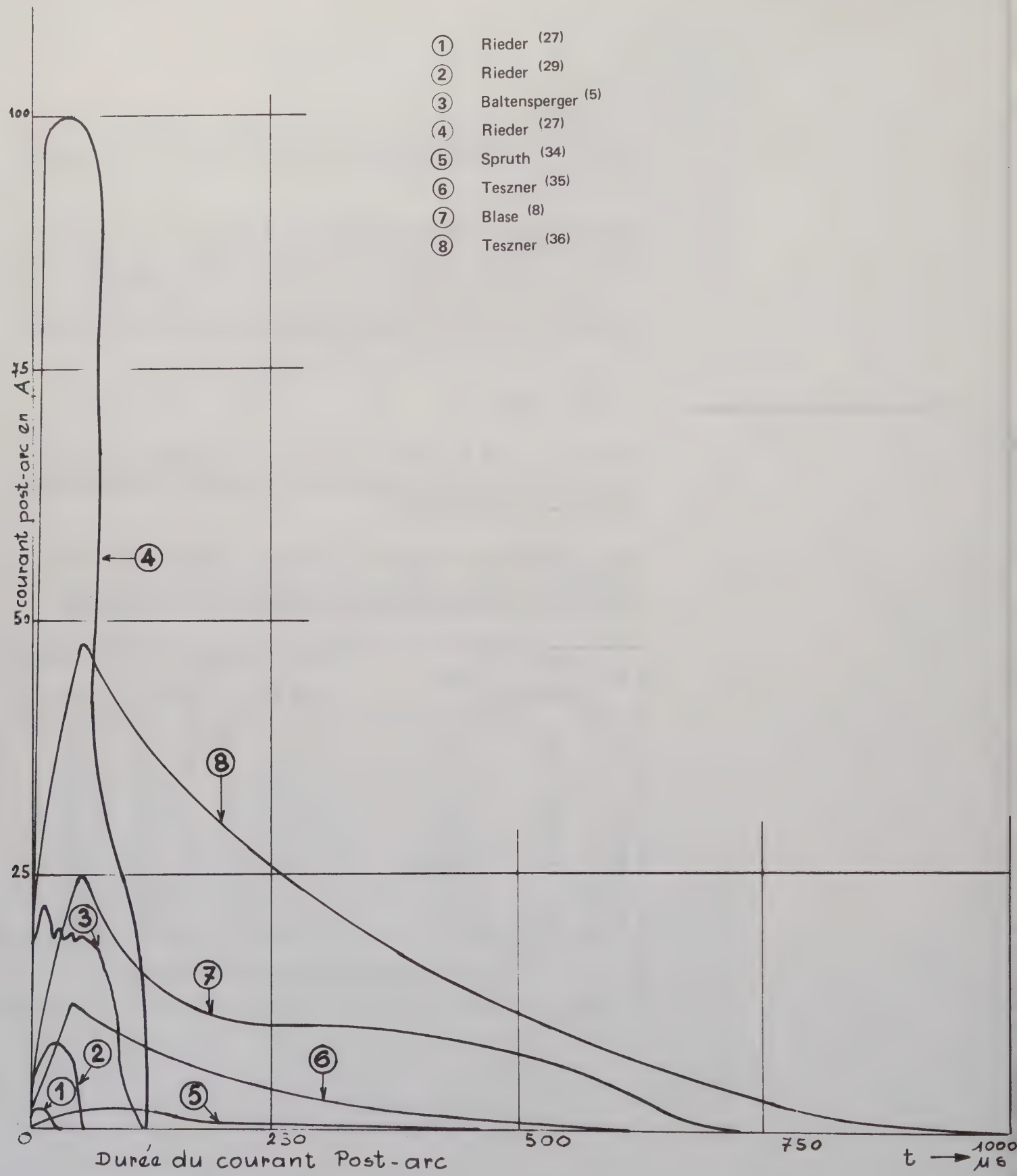


Fig. 4.6. - Résultats publiés des mesures de courants post-arc
dans les disjoncteurs pneumatiques
moyen de mesure : shunt à faible résistance

Pour mieux apprécier la fidélité de ces mesures, nous avons reproduit les oscillogrammes correspondant à ces mesures dans la figure 4.6.

2. discussion des résultats

Dans la figure 4.6. on constate que l'amplitude, la durée et la forme des courants post-arc ne sont pas du tout uniformes.

Ces différences sont vraisemblablement dues en partie aux différences des constantes de temps des appareils utilisés. Les précautions à prendre dans le montage de l'appareillage de mesure que nous avons décrit doivent être parfaitement exécutées. Plus ou moins bien respectées, elles peuvent contribuer à une erreur considérable.

5. LES NOUVEAUX MOYENS DE MESURE DES COURANTS POST-ARC

5.1. nécessité d'entreprendre la recherche de nouveaux moyens de mesure

L'analyse que nous venons de faire dans le chapitre précédent , nous permet de tirer les conclusions suivantes:

. la mesure des courants post-arc, à l'aide d'un shunt à faible résistance, est le seul procédé utilisé comme moyen de mesure convenable.

. les méthodes de mesure qui utilisent le magnétron ou le transformateur d'intensité sont critiquables et sont très peu ou presque pas utilisées.

. même les résultats obtenus en utilisant la méthode du shunt sont parfois contradictoires et la possibilité d'obtenir des mesures fausses n'est pas négligeable.

On doit insister particulièrement sur le fait que le moyen de mesure doit enregistrer le courant post-arc quand il existe vraiment. L'enregistrement du courant post-arc, quand il n'existe pas, risque de donner une interprétation incorrecte des phénomènes.

Ces circonstances exigent la pratique simultanée de méthodes de mesure de natures différentes se contrôlant entre elles, et permettant d'obtenir, lorsqu'il y a concordance, des résultats auxquels on peut se fier.

5.2. mesure des courants post-arc à l'aide de l'effet Hall

5.2.1. introduction

Le fonctionnement de cette méthode de mesure est fondé sur la mesure du champ magnétique, à l'aide d'un générateur à effet Hall, autour d'un conducteur qui est traversé par le courant à mesurer.

Le phénomène de Hall, découvert en 1879 par le physicien américain E.H. HALL, est resté une curiosité de laboratoire jusqu'à l'avènement des semi-conducteurs, en raison de la faible tension de Hall qu'il produit dans les conducteurs classiques. Le développement technique dans le domaine des semi-conducteurs a permis la réalisation de générateurs de Hall précis et stables, et ce n'est qu'au cours de ces dernières années que les recherches ont abouti à des réalisations satisfaisantes.

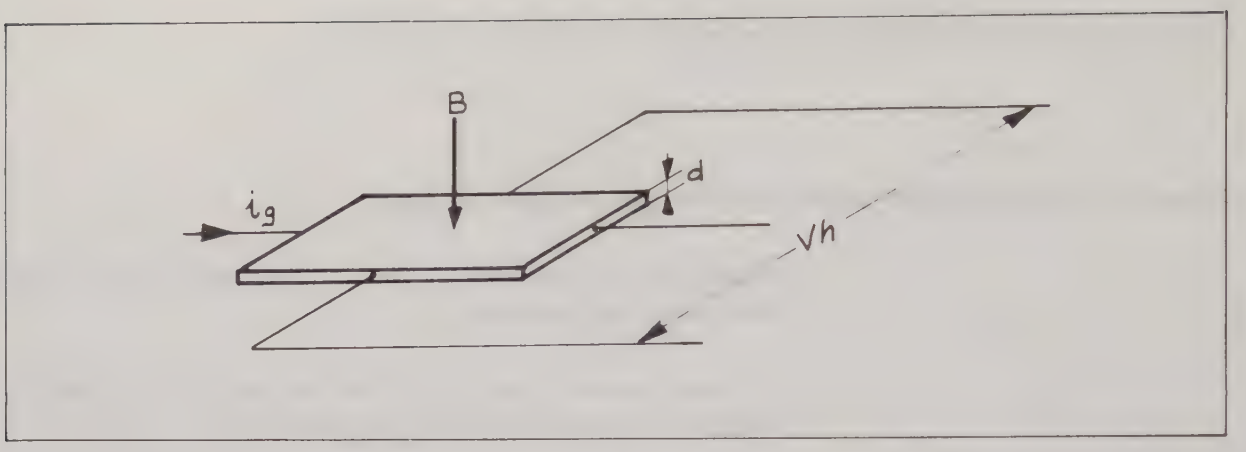


Fig. 5.1. - Schéma de principe d'un générateur à effet Hall

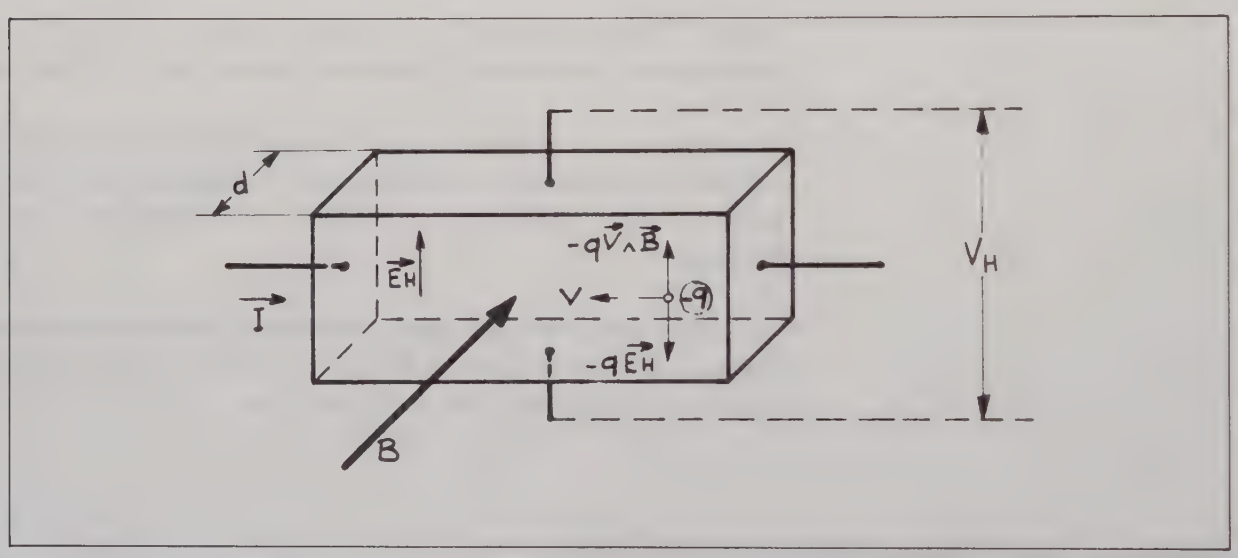


Fig. 5.2. - Illustration des forces exercées sur un électron dans la théorie classique. Apparition du champ électrique de Hall

5.2.2. explication de l'effet Hall

1. rappel de l'effet Hall

Le générateur à effet Hall est constitué par une plaquette semi-conductrice qui, traversée par un courant I_g et placée dans un champ d'induction magnétique B normal à ses grandes faces (Fig. 5.1.), délivre une tension de Hall V_H, telle que

$$V_H = \frac{R_H}{d} \times I_g \times B \qquad (45)$$

R_H est la constante de Hall (propriété du matériau) et d est l'épaisseur de la plaquette.

2. explication physique du phénomène

On peut donner une explication physique du phénomène de Hall à l'aide d'une théorie classique.

Supposons que dans une plaquette longue, pourvue de larges électrodes d'arrivée du courant (Fig.5.2.), tous les électrons sont en déplacement uniforme à une vitesse V. Lorsqu'un champ d'induction magnétique est appliqué perpendiculairement à l'une des grandes faces de la plaquette, les électrons de charge -q sont soumis à une force:

$$\vec{F_B} = -q\,\vec{V} \Lambda \vec{B} \qquad (46)$$

Les électrons soumis à cette force tendent à être déviés de leurs trajectoires vers l'une des petites faces, donc la face avant tend à se charger négativement et la face arrière positivement. Le déséquilibre de charge fait donc apparaître un champ électrique E_H appelé champ de Hall. Ce champ E_H va croissant jusqu'à ce que la force (F_H) qu'il applique aux électrons équilibre celle du champ d'induction (F_B) c'est-à-dire

$$\vec{F_H} + \vec{F_B} = O \qquad (47)$$

$$\text{où} \quad -q\vec{V} \Lambda \vec{B} + (-q)\,\vec{E_H} = O \qquad (48)$$

Si n est le nombre d'électrons mobiles par unité de volume de matériau, la densité de courant est

$$J = -nq\vec{v} \qquad (49)$$

donc

$$E_H = -\left(-\frac{1}{qn}\,\vec{J} \Lambda \vec{B}\right) \qquad (50)$$

$$= -\frac{1}{qn}\,\vec{B} \Lambda \vec{J} \qquad (51)$$

En mettant

$$R_H = -\frac{1}{qn} \qquad (52)$$

on a

$$E_H = R_H \vec{B} \Lambda \vec{J} \qquad (53)$$

En simplifiant, on peut écrire pour la différence de potentiel

$$V_H = \frac{R_H \times B_z\, J \times db}{d} \qquad (54)$$

$$V_H = R_H \times \frac{B_z \cdot I_x}{d} \qquad (55)$$

où I_x est l'intensité totale du courant.

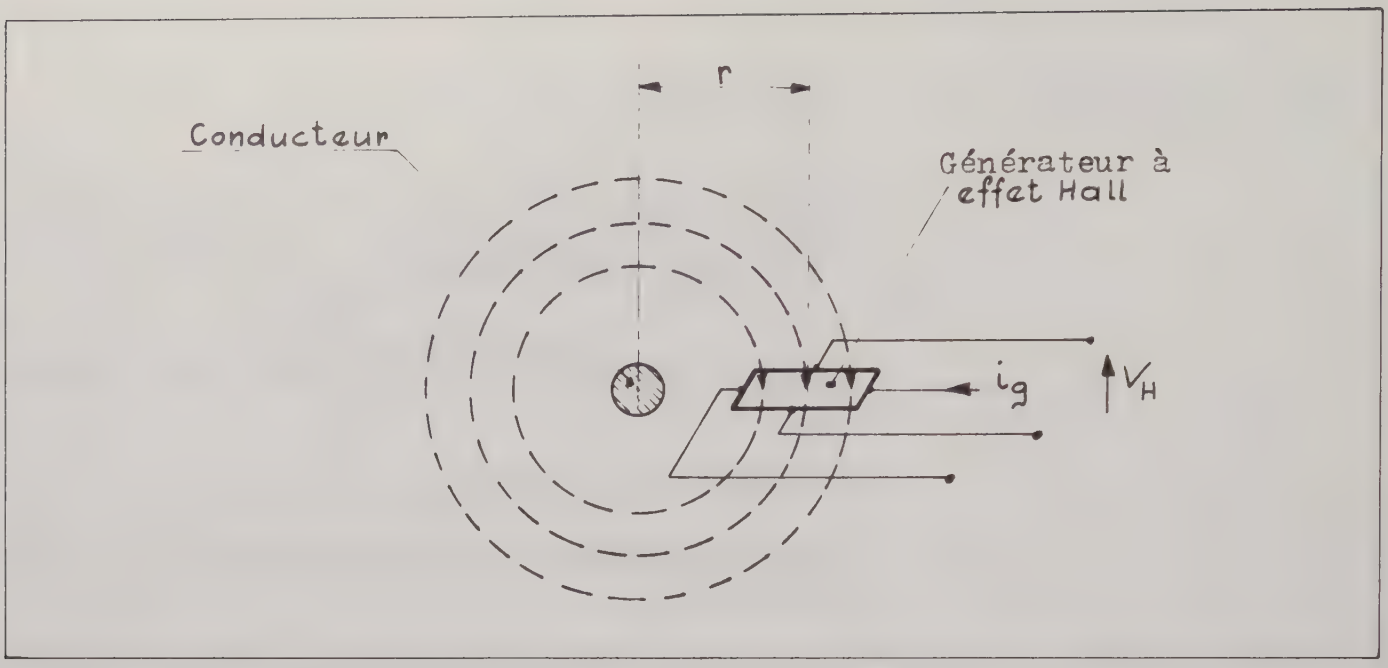


Fig. 5.3. - a - mesure d'un courant à l'aide d'un générateur à effet Hall

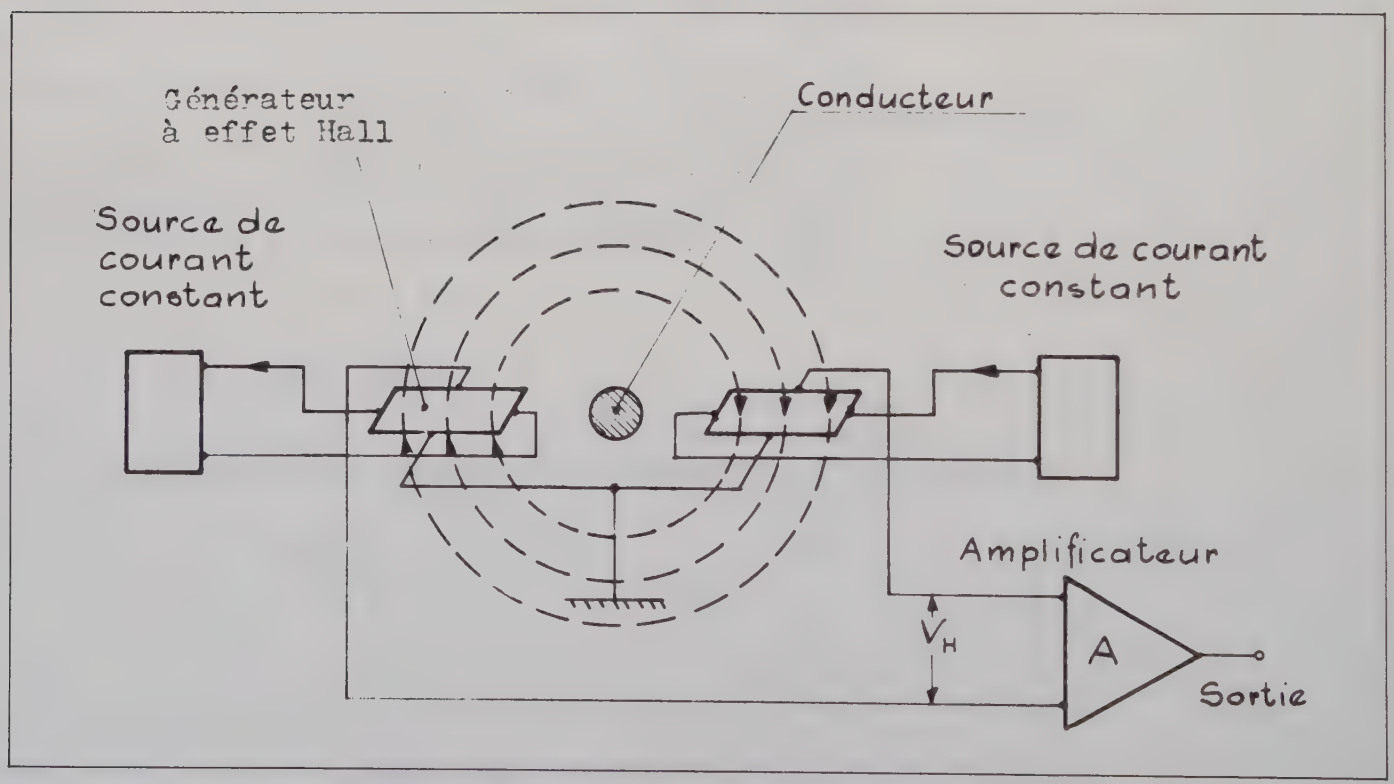


Fig. 5.3. - b - deux générateurs à effet Hall branchés en compensation

Comme la densité des porteurs mobiles d'un semi-conducteur est beaucoup plus faible que celle du métal, le coefficient de Hall d'un semi-conducteur est beaucoup plus élevé que celui du métal.

On peut écrire l'équation 55 sous la forme

$V_H = K \cdot I_g \times B$

où k est le coefficient de sensibilité du générateur et s'exprime en Volts par ampère Tesla, et I_g est le courant de commande qui le traverse.

5.2.3. utilisation des générateurs à effet Hall pour mesurer le courant

1. principe

L'équation $V_H = k.I_g B$ nous indique que si l'on maintient le courant de commande I_g constant, la tension de Hall est proportionnelle au champ d'induction magnétique B. Si le générateur à effet Hall est placé (Fig. 5.3.a) à une distance r du centre d'un conducteur véhiculant le courant à mesurer, le générateur sera soumis à un champ magnétique.

$$B = \mu_0 \frac{I}{2\pi r} \text{ Tesla} \qquad (56)$$

où I est le courant en ampères
et r est la distance en mètres.

La tension de sortie du générateur à effet Hall est

$$V_H = \mu_0 \frac{I}{2\pi r} K.I_g \qquad (57)$$
$$= K_1 I \qquad (K_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} K.I_g)$$

C'est-à-dire que la tension de sortie du générateur à effet Hall est directement proportionnelle au courant dans le conducteur.

2. compensation contre les champs magnétiques extérieurs

La disposition décrite ci-dessus est susceptible d'être fortement influencée par la présence d'un champ magnétique extérieur. Si nous mettons deux générateurs à effet Hall symétriquement de chaque côté du conducteur, ils reçoivent le champ magnétique produit par le courant en sens opposé; tandis que le champ extérieur supposé homogène et unidirectionnel est reçu par les générateurs dans le même sens. (Voir Fig. 5.3.b).

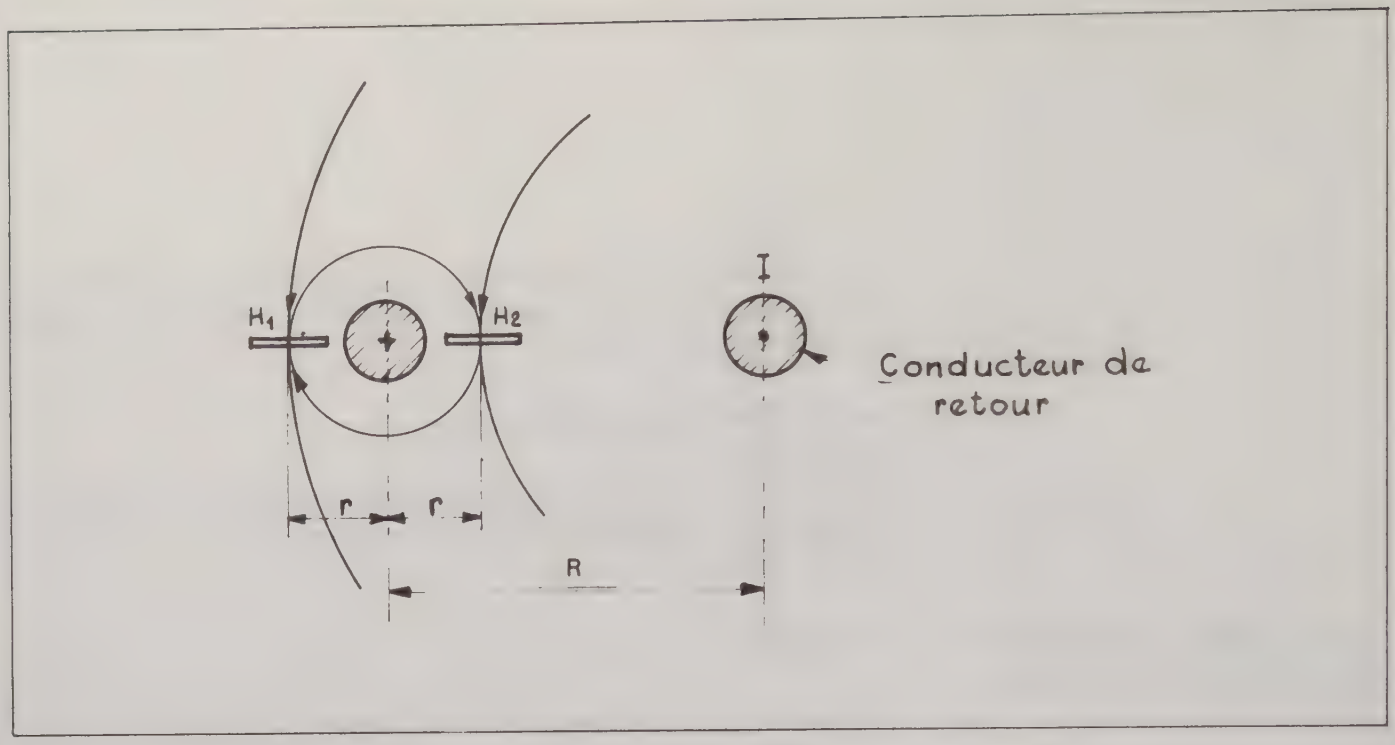


Fig. 5.4. - Influence du courant dans le conducteur de retour

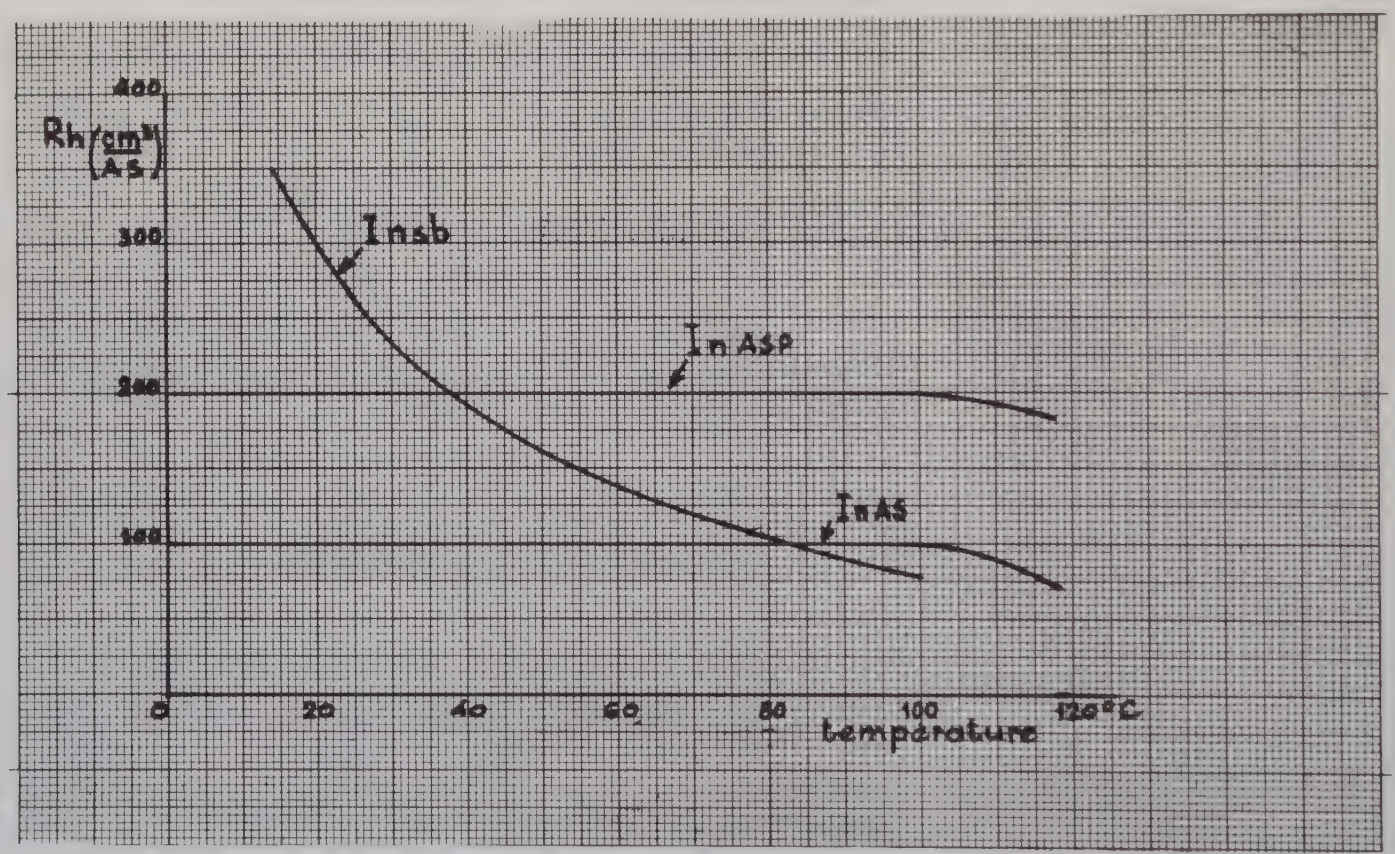


Fig. 5.5. - Variation de la constante de Hall pour différents matériaux en fonction de la température

En alimentant les deux générateurs séparément et en les mettant en opposition du côté tension, la tension de sortie totale du dispositif sera uniquement due au courant dans le conducteur. Les tensions dues au champ magnétique extérieur s'annulent mutuellement.

De plus, cette disposition multiplie par deux la sensibilité de la disposition précédente.

influence du courant dans le conducteur de retour

Si le champ magnétique n'est pas homogène, la compensation dont nous venons de parler ne sera pas parfaite. Un tel champ magnétique peut être créé par le courant dans le conducteur de retour. L'erreur est maximale quand les générateurs de Hall sont placés sur le même plan que les conducteurs véhiculant (Voir Fig. 5.4.). Les champs magnétiques H_1 et H_2 aux points où les générateurs sont placés, sont donnés par

$$H_1 = \frac{I}{2\pi r}\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R+r}\right) \tag{58}$$

$$H_2 = \frac{I}{2\pi r}\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{R-r}\right) \tag{59}$$

où I est le courant dans les conducteurs placés à distance R et r la distance des générateurs à effet Hall à partir du centre du conducteur.

La tension de Hall des générateurs branchés en série sera proportionnelle à la somme des deux champs magnétiques agissant sur les générateurs.

L'erreur due à l'influence du courant de retour sera

$$\epsilon = \frac{1}{2}\left(\frac{r}{R-r} - \frac{r}{R+r}\right) = \frac{1}{\left(\frac{R}{r}\right)^2 - 1} \tag{60}$$

Si $R > 10\ r$, l'erreur est inférieure à 1%, c'est-à-dire que l'erreur peut être négligée si la distance du conducteur de retour est supérieure à 20 centimètres (pour $r = 1$ cm). Donc, notre système de compensation reste encore efficace.

3. sensibilité et précision de la mesure

La sensibilité d'un dispositif de mesure du courant fondé sur le principe que nous venons d'étudier, dépend

1) des caractéristiques des générateurs à effet Hall
2) de leurs distances par rapport au conducteur.

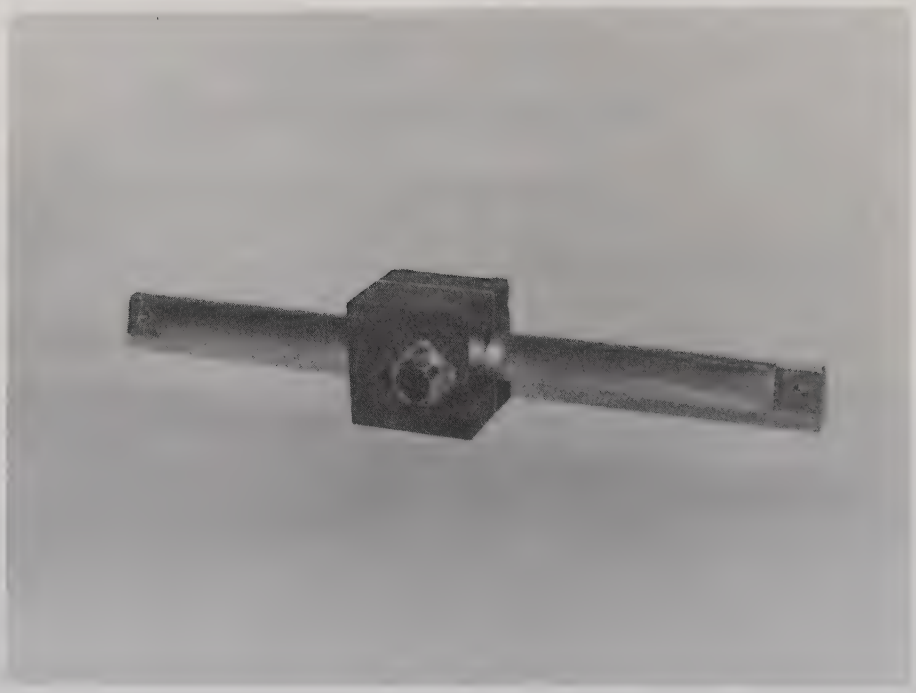


Fig. 5.6. - Capteur d'intensité à effet Hall

Le choix des générateurs à effet Hall joue un rôle très important. Le matériau choisi pour un générateur à effet Hall doit avoir les qualités principales suivantes:
. une tension de Hall élevée, c'est-à-dire le coefficient de Hall R_H élevé
. le coefficient de Hall doit être le plus indépendant possible de la température.

Les recherches dans ce domaine ont permis de mettre au point des générateurs à effet Hall ayant une sensibilité de l'ordre d'une centaine de millivolts par ampère Tesla et ayant une précision de classe 0,1.

Nous avons choisi les générateurs d'arséniure d'indium produit par la maison SIEMENS[31]. Ils ont une sensibilité de 300 mV pour un courant de commande de 400 mA (valeur nominale) et pour B = 1 tesla et leur constante de Hall varie peu avec la température. (Voir Fig. 5.5.).

En mettant les générateurs à effet Hall plus près du conducteur on pourra augmenter le champ magnétique auquel ils sont soumis et ainsi la sensibilité du dispositif sera augmentée. La distance minimum à respecter est limitée par les conditions d'isolement.

4. réalisation du dispositif de mesure du courant

Nous avons réalisé un dispositif de mesure «Capteur d'intensité à effet Hall», en utilisant deux générateurs Siemens de type FR24 placés symétriquement autour du conducteur, les deux générateurs sont alimentés séparément par un courant de commande constant de 400 mA à partir de deux alimentations stabiblisées. Ils sont branchés en opposition et la tension est amplifiée avec un amplificateur.

La figure 5.6. indique le montage des générateurs à effet Hall autour du conducteur véhiculant le courant à mesurer. (La partie électronique, c'est-à-dire l'alimentation des générateurs à effet Hall et l'amplificateur, sera longuement discutée dans la réalisation finale de l'appareil de mesure des courants post-arc).

Les principales caractéristiques de ce dispositif sont:
. Courant de commande: 400 mA
. Courant minimal mesurable: 40 A
. Capacité de surcharge: 40 kA.

Le courant minimal mesurable est en grande partie limité par le bruit de fond des générateurs à effet Hall.

5. recherche des moyens pour augmenter la sensibilité du dispositif

5.a. utilisation de plusieurs générateurs à effet Hall

Au premier abord, on peut penser augmenter la sensibilité du dispositif en utilisant plusieurs générateurs en série. Mais cette solution n'est pas réalisable dans le cas particulier des mesures du courant post-arc pour les raisons suivantes:
. L'utilisation de plusieurs générateurs va augmenter la tension (signal) totale, et en même temps le bruit de fond du dispositif sera augmenté, c'est-à-dire que le rapport signal/bruit restera à peu près le même que dans le cas d'un dispositif utilisant deux générateurs en compensation.
. Le bruit de fond, qui est la caractéristique de construction de générateur à l'effet Hall, est un signal ayant une fréquence très élevée de l'ordre de quelques Méga-Hertz.

Pour mesurer les courants à basse fréquence, par exemple 50 Hz, on pourra filtrer les hautes fréquences et ainsi augmenter la sensibilité permettant de mesurer les faibles courants.

Cette solution devient impossible dans le cas des mesures des courants post-arc qui ont une haute fréquence.

5.b. utilisation d'un circuit magnétique

La tension de Hall, qui est une fonction du champ magnétique, sera fortement augmentée, pour un courant donné, si le champ magnétique auquel il est soumis est augmenté. La solution consiste à mettre le générateur dans l'entrefer d'un circuit magnétique ayant une haute perméabilité.

5.2.4. dispositif pour mesurer les courants post-arc

1. principe de fonctionnement

Un montage de mesure des courants de faible valeur avec des générateurs à effet Hall se compose d'un circuit magnétique qui entoure la barre traversée par le courant à mesurer et dans l'entrefer duquel est placé un générateur à effet Hall. Si le générateur à effet Hall est excité par un courant de commande constant, la tension de Hall qu'il fournit est proportionnelle à l'induction dans l'entrefer et, par conséquent, au flux du circuit magnétique induit par le courant.

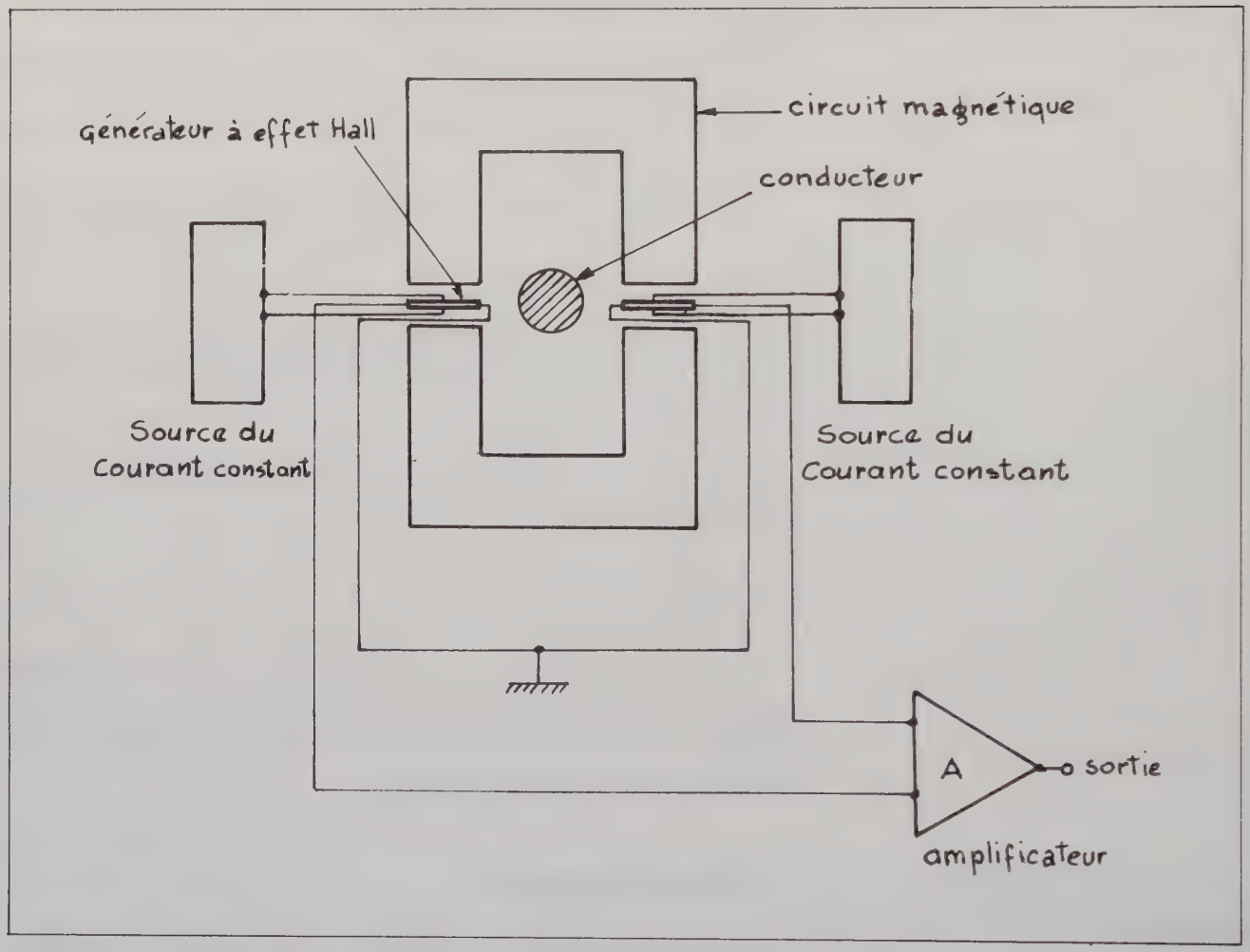


Fig. 5.7. - Capteur d'intensité à effet Hall utilisant un circuit magnétique

On choisira, en vue d'un montage aussi simple que possible, en pratique, un circuit magnétique en deux parties (Fig. 5.7.). On dispose de deux entrefers d'une hauteur δ pour la mise en place des générateurs.

D'après le théorème d'Ampère, nous pouvons écrire :

$$\int HdL = H_{L_1}\delta + H_{L_2}\delta + H_{F_e} L_{F_e} = NI \quad (61)$$

Où

H_{Fe} : champ magnétique dans le fer (circuit magnétique)

H_{L1}, H_{L2} : champ magnétique dans les deux entrefers

δ : hauteur d'entrefer

L_{Fe} : longueur dans le fer

B_1, B_2 : inductions dans les entrefers.

c'est-à-dire

$$H_{L_1}\delta + H_{L_2}\delta = NI - H_{F_e} L_{F_e} \quad (62)$$

ou $$\delta\,(H_{L_1} + H_{L_2}) = (NI - H_{F_e} L_{F_e}) \quad (63)$$

Nous pouvons écrire

$$H_{L_1} = \frac{B_1}{\mu_0} \quad (64)$$

$$H_{L_2} = \frac{B_2}{\mu_0} \quad (65)$$

En mettant ces valeurs de H_{L1} et H_{L2}, nous obtenons

$$\left(\frac{B_1 + B_2}{\mu_0}\right)\delta = (NI - HF_eLF_e) \quad \text{ou} \quad (66)$$

$$(B_1 + B_2) = \frac{\mu_o}{\delta}\,[NI - H_{F_e} L_{F_e}] \quad (67)$$

Dans ces conditions, l'induction est proportionnelle au courant si

$$H_{Fe} L_{Fe} \ll NI \quad (68)$$

On doit donc utiliser un circuit magnétique qui a un cycle d'hystérésis très étroit et une induction de saturation élevée.

L'équation (67) devient

$$B_1 + B_2 = \frac{\mu_o}{\delta}\,(NI) \quad (69)$$

$$B_1 + B_2 = \frac{\mu_o}{\delta}\,I \quad (N \text{ étant égal à } 1) \quad (70)$$

Cette proportionnalité simple sera valable jusqu'à une valeur maximale du courant I qui sera conditionnée par les dimensions du circuit magnétique, la hauteur d'entrefer et la perméabilité du circuit magnétique.

On peut mesurer correctement le courant I en plaçant un générateur de Hall dans chacun de ces entrefers et en additionnant les tensions de Hall proportionnelles aux inductions dans les entrefers.

2. les sources d'erreurs et leur élimination

La validité et la précision de mesure du dispositif «capteur d'intensité à effet Hall utilisant le circuit magnétique», seront conditionnées par les erreurs pouvant être classées selon les trois catégories suivantes:

. Erreurs dues aux imperfections du générateur à effet Hall

. Erreurs dues au montage d'ensemble du dispositif

. Erreurs dues à l'utilisation du circuit magnétique.

2.a. tension résiduelle résistive à vide

Les électrodes de Hall ne sont pas placées rigoureusement en face l'une de l'autre sur une même équipotentielle en absence d'induction magnétique. Il existe pour cette raison, entre les électrodes de Hall, une tension due à la chute résistive qui s'ajoutera algébriquement à la tension de Hall. Cette erreur de zéro peut être éliminée par un réseau approprié de compensation.

2.b. tension résiduelle induite par le champ magnétique

Elle provient des forces contre-électromotrices induites par les variations du champ magnétique dans les boucles qui font le circuit de Hall et qui est $e = S\frac{dB}{dt}$ où S est la surface de boucle et B le champ d'induction magnétique produit par le courant. On peut à la construction éliminer cette tension résiduelle, produite dans les générateurs en l'absence de courant de commande, par une disposition spéciale des électrodes de Hall. L'électrode supérieure revient exactement au milieu du générateur de Hall. Ainsi, les tensions induites s'annulent mutuellement. Les fils de liaisons doivent être soigneusement torsadés pour diminuer les boucles au minimum.

2.c. magnéto-résistance

La résistance d'un générateur à effet Hall croît avec l'induction magnétique appliquée perpendiculairement à la plaquette. A cause de cette variation de résistance, l'alimentation en courant exige une stabilisation parfaite. Celle-ci peut être réalisée à partir d'une alimentation stabilisée en tension et par l'adjonction d'une forte résistance en série avec le générateur.

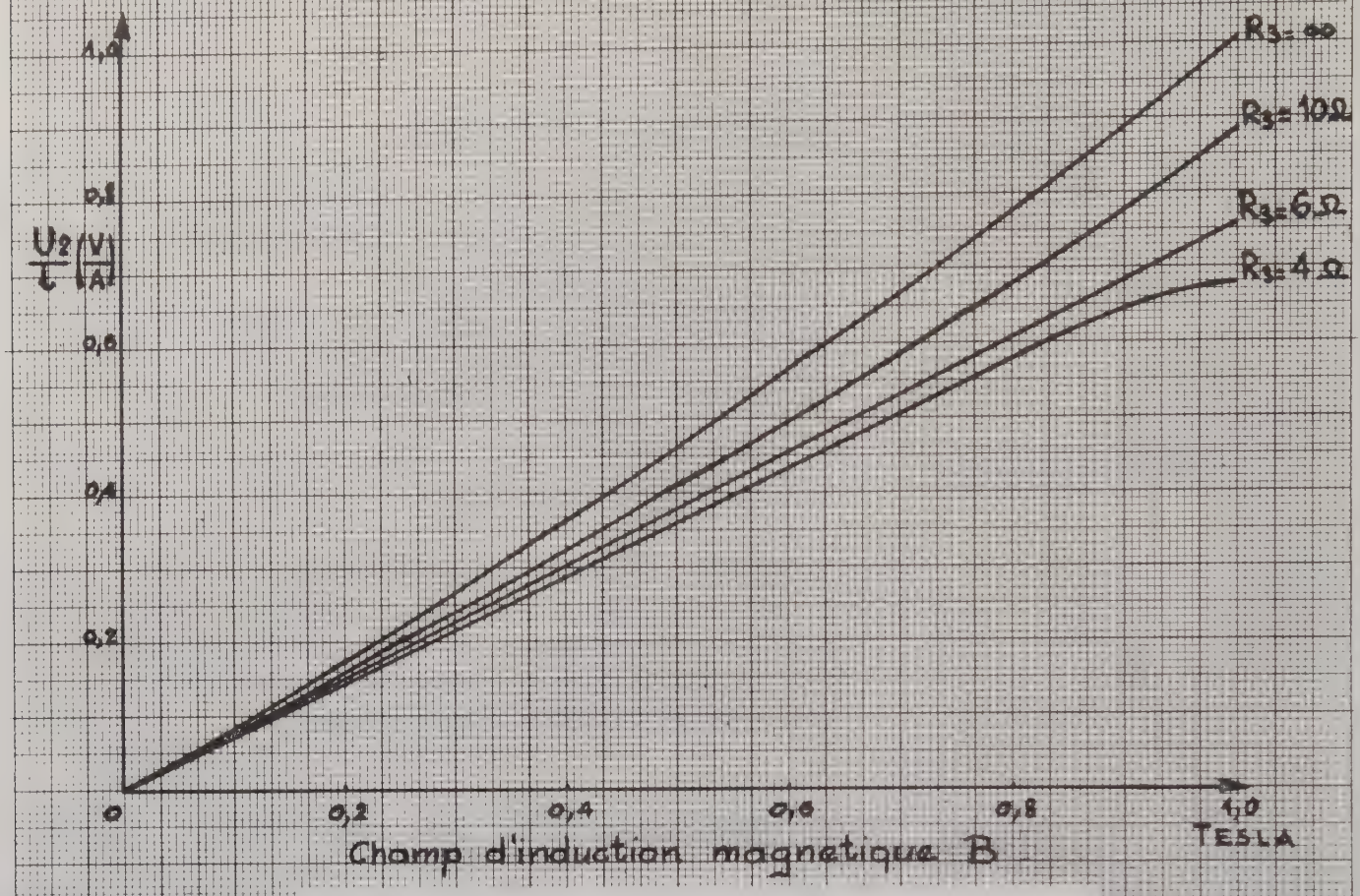


Fig. 5.8. - Tension de Hall en fonction du champ magnétique pour différentes valeurs de résistance de charge

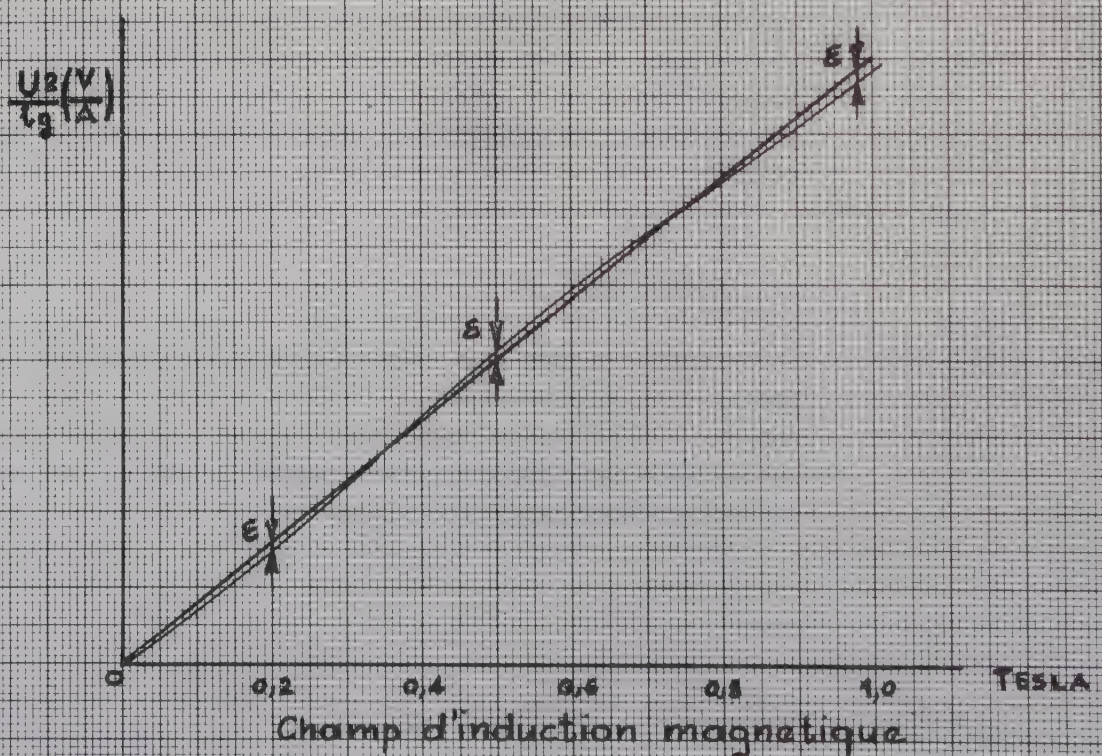


Fig. 5.9. - Caractéristique idéale et définition de l'erreur

2.d. erreur de linéarité

La figure (5.8) montre la tension de Hall en fonction du champ magnétique B pour diverses résistances de charge dans le cas d'un générateur FA24.

La meilleure linéarité entre le courant de commande et le champ magnétique B est obtenue pour une résistance terminale R_L bien déterminée dans notre cas $R_L = 6\,\Omega$.

Cette relation entre la tension de Hall et le champ magnétique même dans le cas d'adaptation linéaire, c'est-à-dire en fermant le circuit avec la résistance R_L, n'est pas idéale. L'erreur de linéarité (Fig. 5.9) dans le cas du générateur FA24 est inférieure à 1% dans l'étendue du champ magnétique B = 0 à B = 1 T. Ceci nous permet d'avoir les mesures avec une précision de 1% qui est suffisante.

2.e. influence de la rémanence du circuit magnétique

Considérons un circuit magnétique ayant un cycle d'hystérésis donné par la Figure 5.10. On note la présence d'une forte rémanence. L'introduction d'un entrefer dans le circuit magnétique change complètement le cycle d'hystérésis. On peut constater que l'induction rémanente est réduite considérablement. Dans ce cas, l'induction rémanente est

$$B_{r_1} = \mu_0 H_c \times \frac{L}{l} \qquad (71)$$

où
$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$
H_c = le champ coercitif
L = Longueur en fer
l = longueur de l'entrefer

En choisissant le matériau à faible champ coercitif et un rapport approprié de $\frac{L}{l}$ on peut réduire cette induction rémanente au minimum. Dans ces conditions, cette rémanence n'est pas trop gênante pour nos mesures.

La figure (5.11) illustre l'influence de la rémanence du circuit magnétique sur l'arrivée du courant au zéro.

Le circuit magnétique ayant un champ coercitif $H_c = 30$ AT/M, une longueur totale d'entrefer l = 1,8 mm et une longueur de fer L = 0,2 m, aura une rémanence.

$$B_{r_1} = 4\pi \times 10^{-7} \times 30 \times \frac{0,2}{1,8 \times 10^{-3}}$$

$$= 4,05 \times 10^{-3}\ T$$

Cela se traduira comme un courant de 1,5 A. Donc le déplacement de zéro sera de l'ordre de 1,5 A. Cette erreur est systématique, on peut donc en tenir compte.

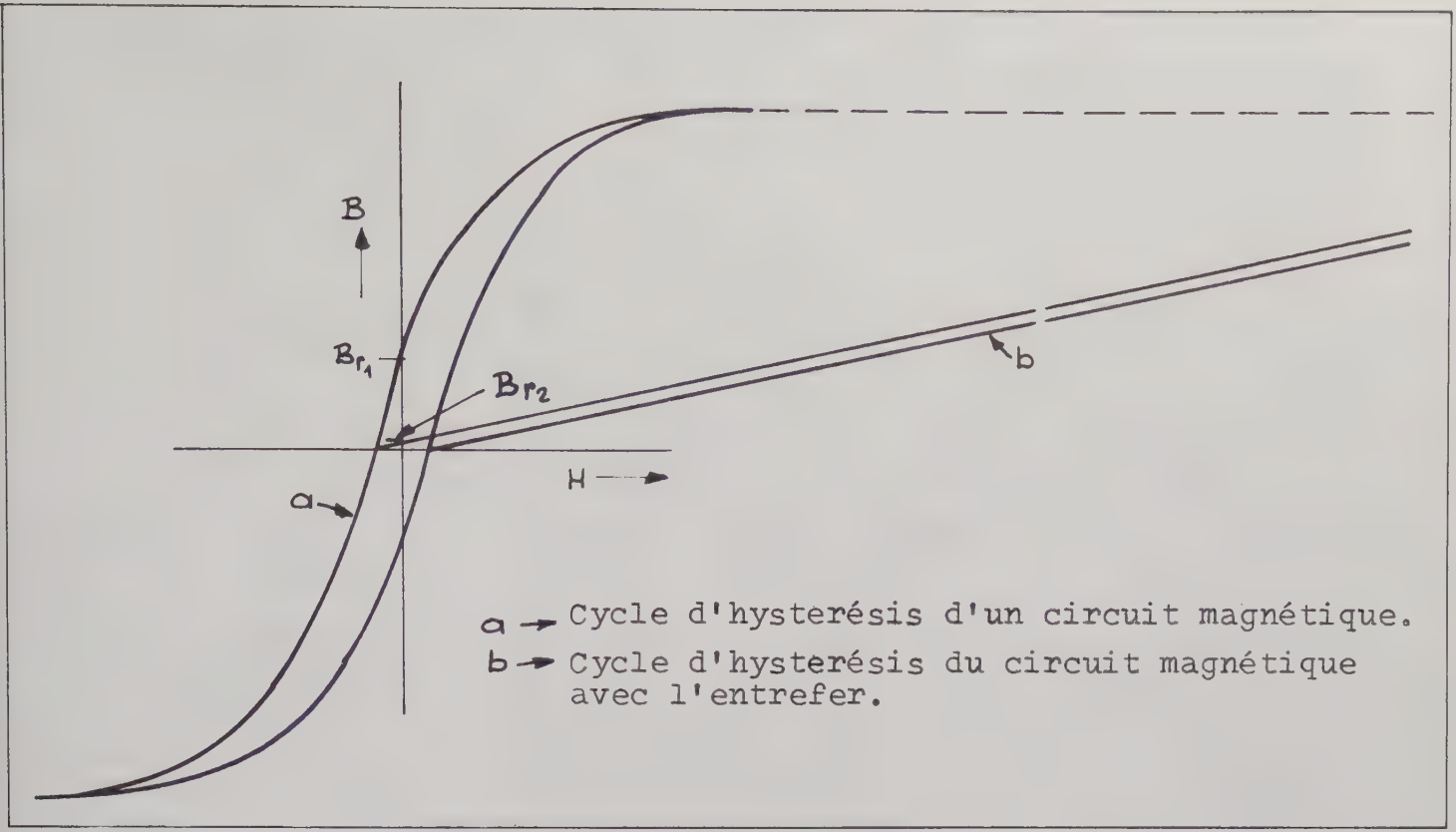


Fig. 5.10. - Influence d'un entrefer sur la rémanence du circuit magnétique

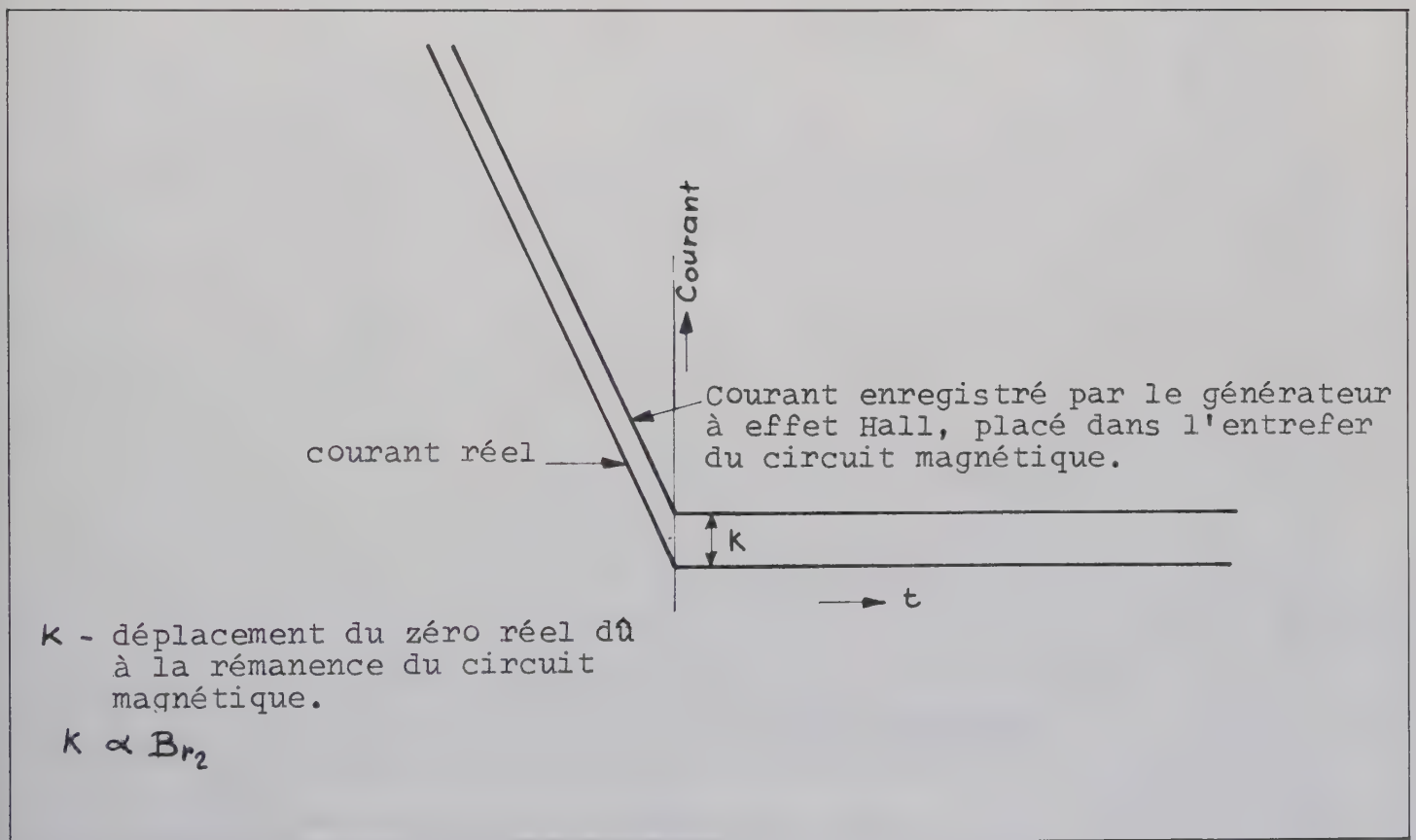


Fig. 5.11 - Influence de la rémanence du circuit magnétique sur l'arrivée du courant au zéro

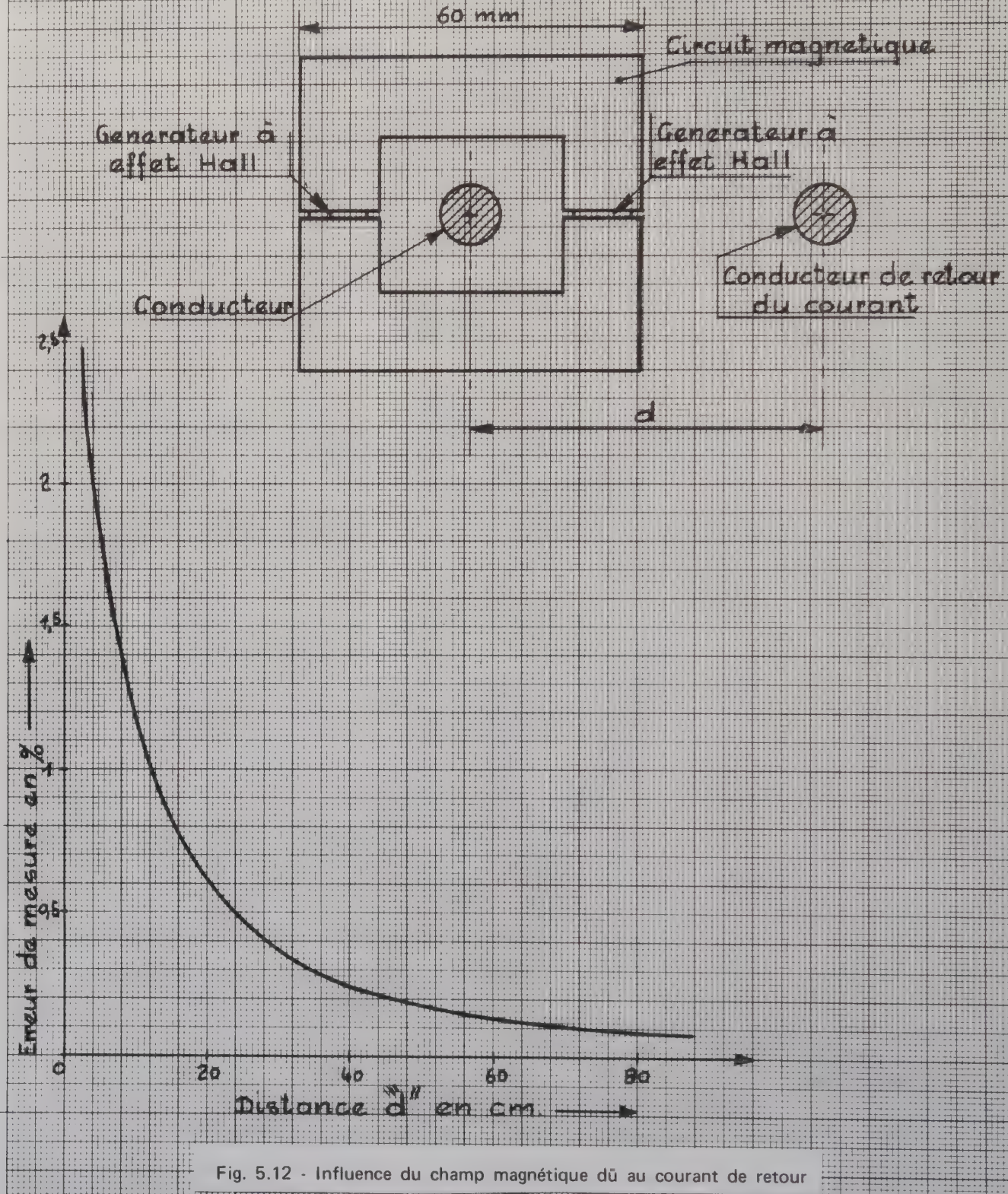


Fig. 5.12 - Influence du champ magnétique dû au courant de retour

2.f. influence des champs magnétiques extérieurs

En l'absence d'une influence perturbatrice et pour une position centrale du conducteur dans le circuit magnétique, la répartition de l'induction est entièrement symétrique et les inductions dans les deux entrefers sont de même valeur et de signes opposés. Les générateurs à effet Hall sont branchés en opposition et la tension totale sera donc proportionnelle à la somme des inductions dans les deux entrefers. S'il y a un champ magnétique extérieur qui est homogène, par exemple le champ terrestre, il sera réparti symétriquement dans les deux entrefers et dans le même sens. Les générateurs à effet Hall étant branchés en opposition, leur tension totale ne sera pas perturbée.

Si le champ magnétique extérieur n'est pas homogène, la répartition de l'induction dans les entrefers devient asymétrique. Dans ce cas, le calcul exact de la répartition d'induction dans les entrefers et le circuit magnétique devient assez complexe.

Nous avons fait des essais pour étudier l'erreur introduite par le champ magnétique due au courant de retour et la figure 5.12 montre les résultats.

Nous constatons que l'erreur introduite est inférieure à 1%, si la distance entre les deux conducteurs est supérieure à 12 cm.

5.2.5. réalisation de l'appareil de mesure

Basé sur les principes que nous venons de discuter, nous avons mis au point un capteur d'intensité à effet Hall pour mesurer les courants post-arc. La figure 5.7. indique le principe du dispositif.

1. choix des éléments

• *circuit magnétique*

Nous avons choisi le circuit magnétique en ferrite [26]. Les caractéristiques principales du circuit magnétique sont:

. Sa haute perméabilité

. Son faible champ coercitif

. Une bonne performance assurée dans une large gamme de fréquences (jusqu'à 1,5 MHz)

. De faibles pertes.

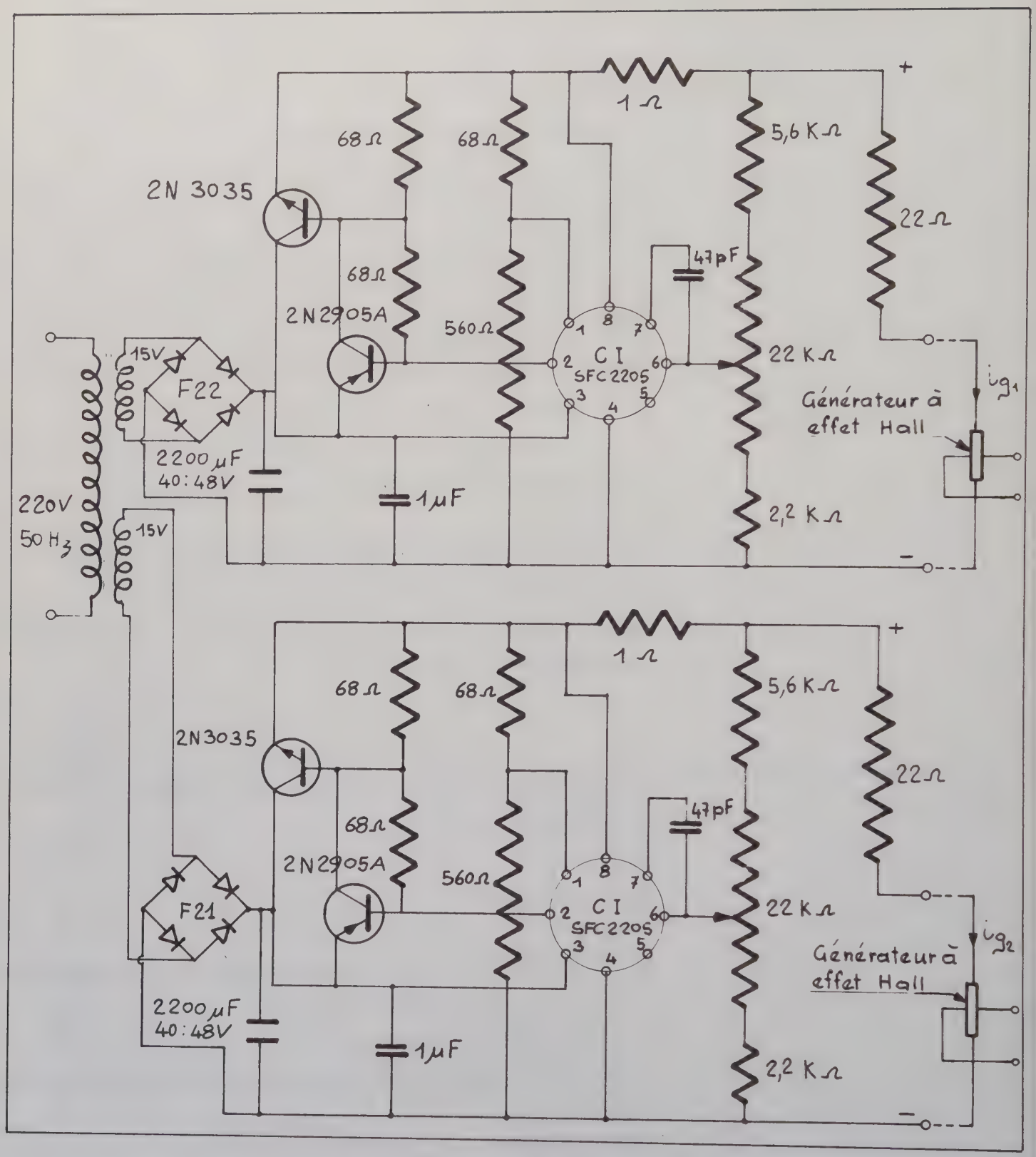


Fig. 5.13. - Alimentation des générateurs à effet Hall

- *générateurs à effet Hall*

Nous avons choisi les générateurs à effet Hall de type FA24 fabriqués par la Maison SIEMENS [31]. Ils ont les caractéristiques essentielles suivantes:

. Haute sensibilité, c'est-à-dire constante de Hall très grande
. Une bonne linéarité entre le champ d'induction magnétique auquel il est soumis et la tension de Hall dans une gamme du champ d'induction magnétique de 0 à 1 Tesla
. Très faible influence de la température sur la constante de Hall
. Très faible composante inductive résiduelle en l'absence du courant de commande
. Une bande passante élevée supérieure à 4 MHz [31]

2. électronique associée

L'ensemble électronique est composé des éléments suivants:
. Alimentation stabilisée pour fournir les courants de commande des générateurs à effet Hall
. Amplificateur pour l'amplification du signal de sortie des générateurs à effet Hall branchés en compensation
. Alimentation de l'amplificateur.

2.a. alimentation stabilisée pour fournir le courant de commande

Pour que la tension du générateur à effet Hall soit stable et linéaire avec le champ magnétique produit par le courant à mesurer, il est nécessaire d'alimenter les générateurs à effet Hall avec un courant de commande constant. Ceci nécessite une alimentation de haute stabilité et de haute précision.

Nous avons réalisé une telle alimentation à partir du secteur en utilisant des circuits intégrés associés d'un circuit de balast. La figure 5.13 présente le schéma électrique de l'alimentation. Les deux générateurs sont alimentés séparément par deux sources de courant identiques. On met une forte résistance en série avec chaque générateur à effet Hall pour diminuer l'influence de la magnéto-résistance.

Caractéristiques principales:
. Courant de sortie = 500 mA
. Stabilité en fonction de la variation de tension du secteur = 4.10^{-4}
. Stabilité en fonction de la charge = 2.10^{-4}
. Taux d'ondulation = 5.10^{-5}

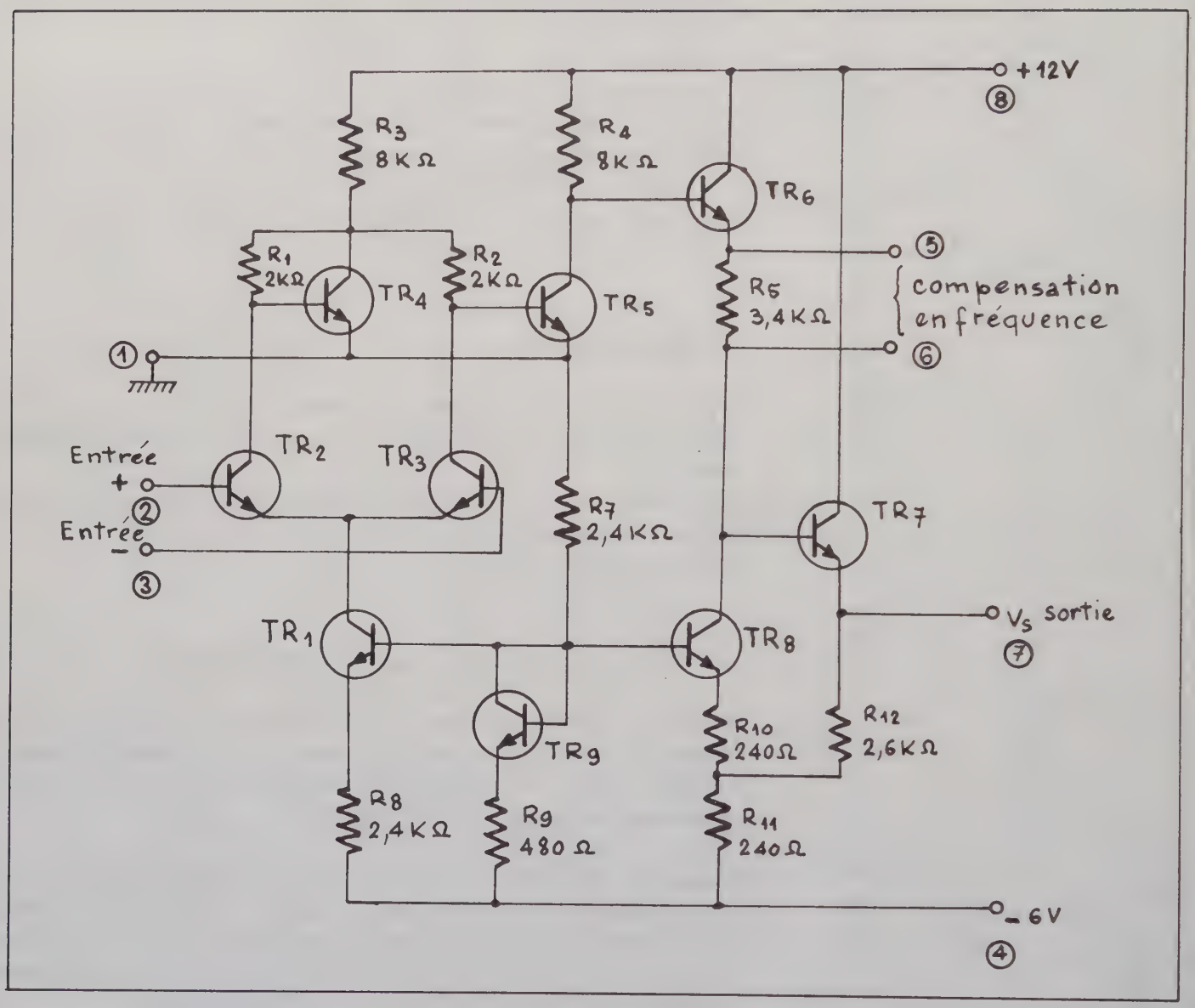


Fig. 5.14. - Schéma électrique de l'amplificateur

2.b. amplificateur

Les deux générateurs à effet Hall qui sont placés dans l'entrefer du circuit magnétique sont branchés en compensation du côté tension et la sortie totale est amplifiée par un amplificateur. La figure 5.14 indique le schéma électrique de l'amplificateur opérationnel . Le branchement de l'amplificateur dans le circuit est présenté dans la figure 5.15a.

L'amplificateur est alimenté par une alimentation stabilisée de +12 Volts – 6 Volts. La réalisation de cette alimentation à partir du secteur est présentée dans la figure 5.15b

• *performance de l'amplificateur*

La figure 5.16 indique la variation de gain de l'amplificateur en fonction de la fréquence. On peut constater que le gain reste constant jusqu'à 2 MHz et ensuite diminue rapidement. Nous pouvons prendre 2 MHz comme bande passante de l'amplificateur.

3. câbles de liaison

La liaison entre le capteur à effet Hall et l'ensemble de système électronique, c'est-à-dire l'alimentation des cellules et l'amplificateur, est réalisée avec un câble blindé. La figure 5.17a indique le câble utilisé et la figure 5.17b montre le mode de branchement.

4. comportement en fréquence du dispositif

La bande passante de l'ensemble du dispositif de mesure dépend du comportement en fréquence

1) des générateurs à effet Hall
2) du circuit magnétique
3) de l'amplificateur

Les générateurs à effet Hall de type FA24 ont une bande passante supérieure à 4 MHz.

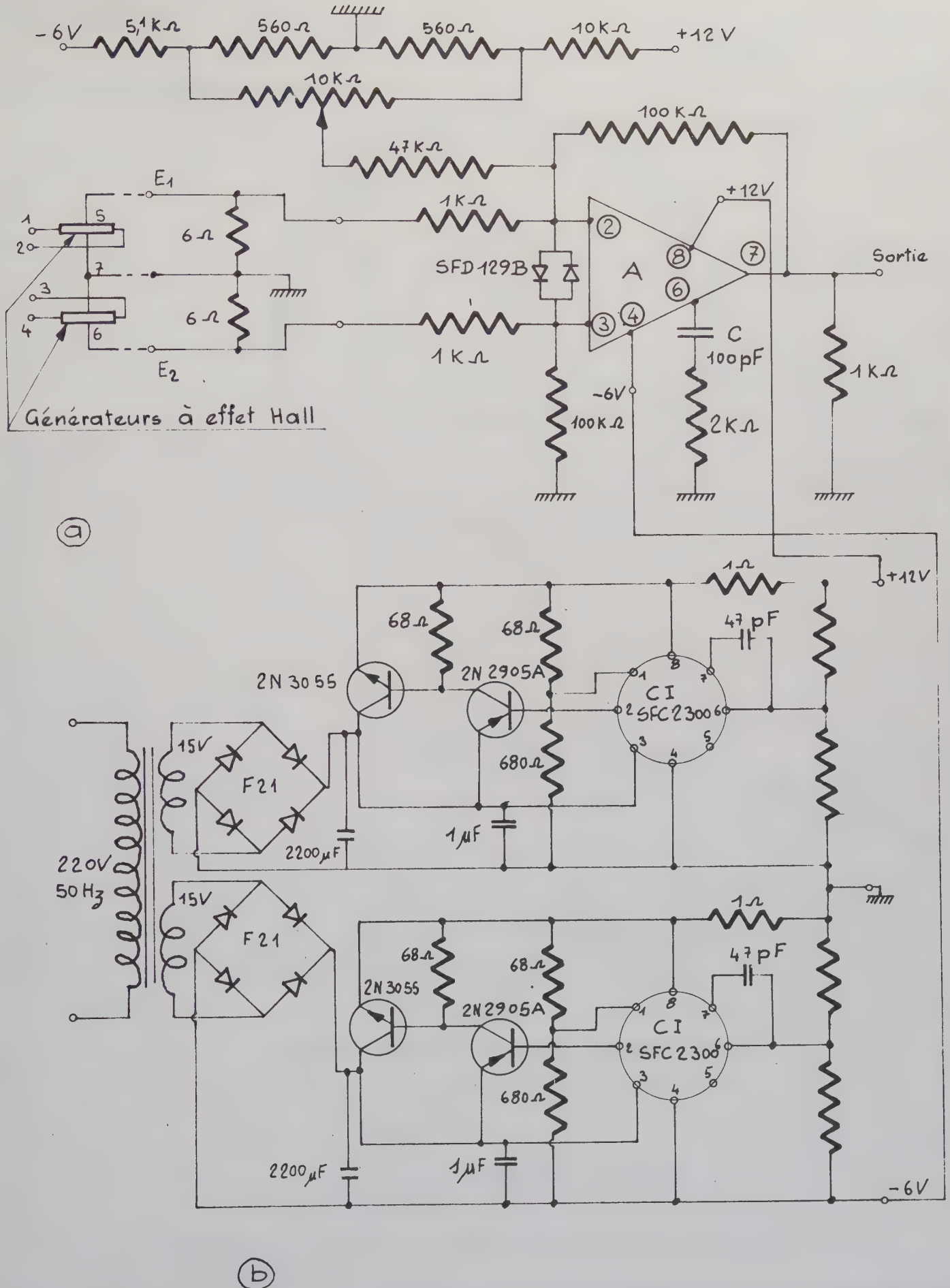


Fig. 5.15. - a - Amplificateur
b - Alimentation de l'amplificateur

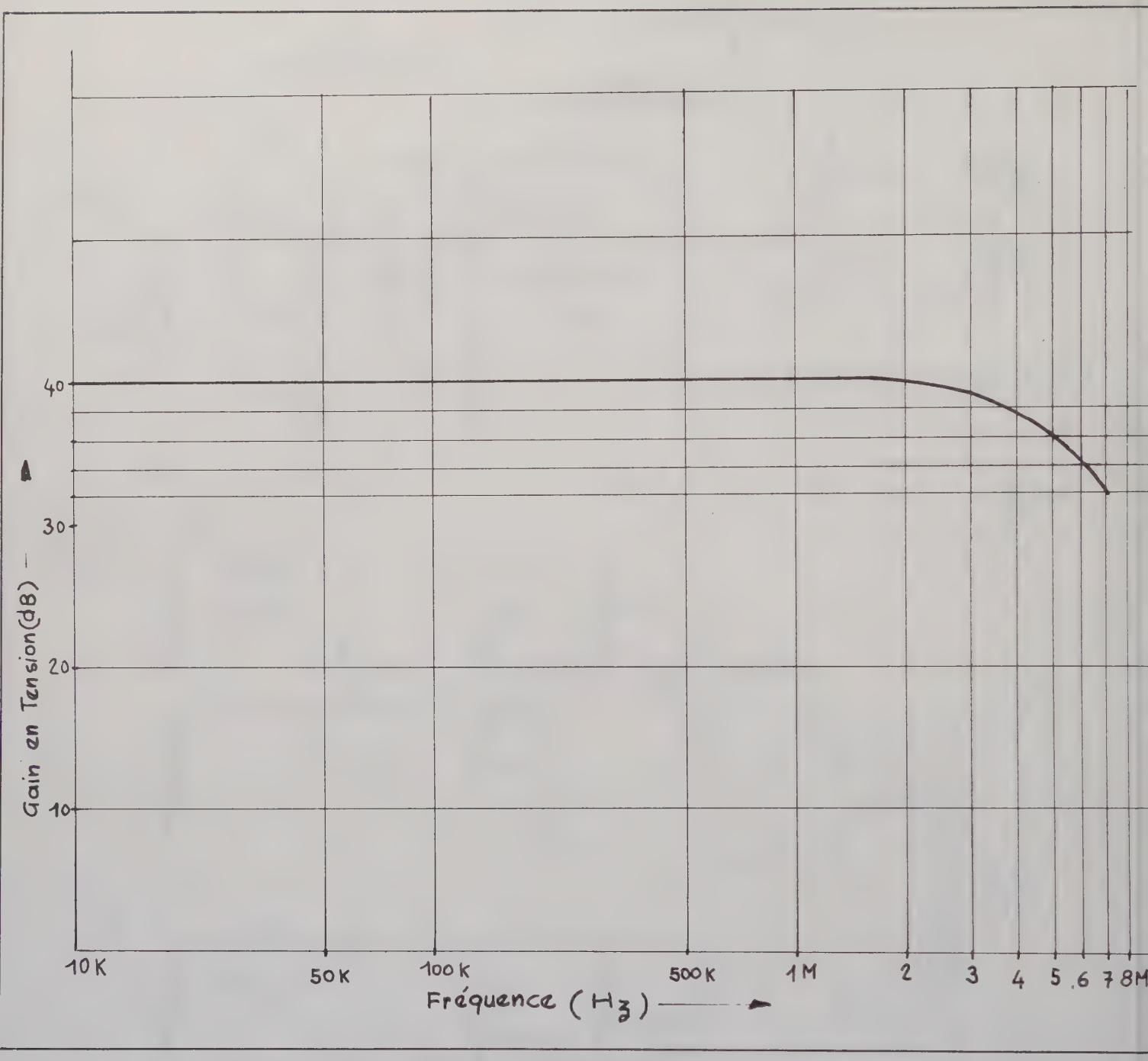


Fig. 5.16 - Réponse en fréquence de l'amplificateur

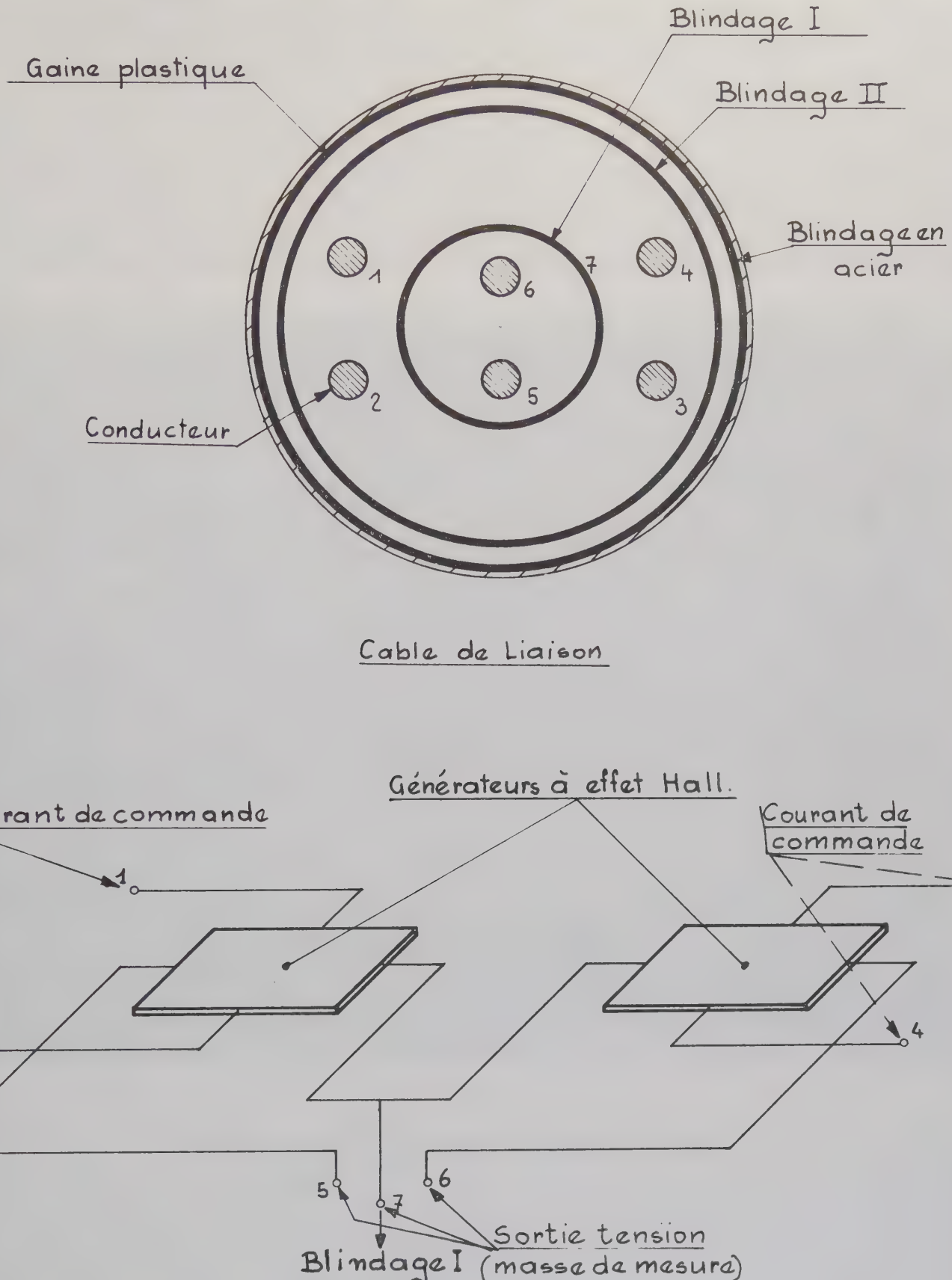


Fig. 5.17. - Branchement des générateurs à effet Hall avec leur alimentation et l'amplificateur

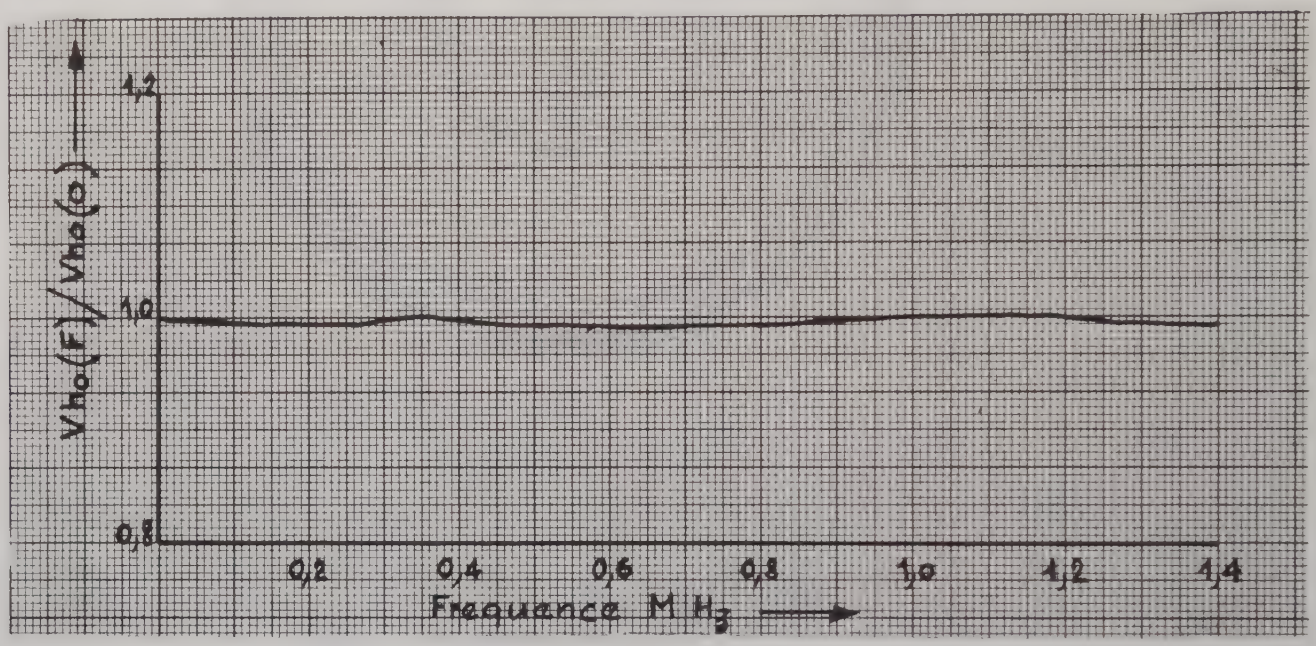


Fig. 5.18. - Comportement en fréquence des générateurs à effet Hall placés dans l'entrefer du circuit magnétique (ferrite)

Fig. 5.19 - Dispositif de mesure du courant post-arc à effet Hall
(appareil réalisé)

Fig. 5.20 - Ampéremètre à effet Hall

La figure 5.18 montre les résultats d'essais sur le comportement en fréquence de deux générateurs FA24 [31] placés dans l'entrefer du circuit magnétique en ferrite. On peut constater que la tension de Hall reste sensiblement constante dans la bande de fréquence jusqu'à 1 MHz.

La bande passante de l'amplificateur utilisé, comme nous l'avons vu, est supérieure à 2 MHz

Ainsi on peut considérer la bande passante de l'ensemble du dispositif supérieure à 1 MHz.
La fig. 5.19. présente l'ensemble du dispositif réalisé.

5. caractéristiques principales du dispositif réalisé

. Capacité de surcharge = 40×10^3 A
. Courant de saturation = 430 A
. Courant minimal mesurable = 1 A
. Erreur de linéarité $<1\%$
. Bande passante = 1×10^6 Hz
. Tension d'isolement = 3 kV eff.

5.2.6. ampéremètre à effet Hall

Nous avons réalisé un ampéremètre à effet Hall pour mesurer les courants continu et alternatif de 1 A à 1000 A. Cet appareil (Fig. 5.20) est en service dans les laboratoires de Recherches Générales. Les caractéristiques principales de cet appareil sont les suivantes:

. Gamme du courant = 1 A à 1 000 A, continu et alternatif
. Erreur de linéarité $<1\%$
. Bande passante = 100 kHz
. Tension d'isolement = 3 kV (eff).

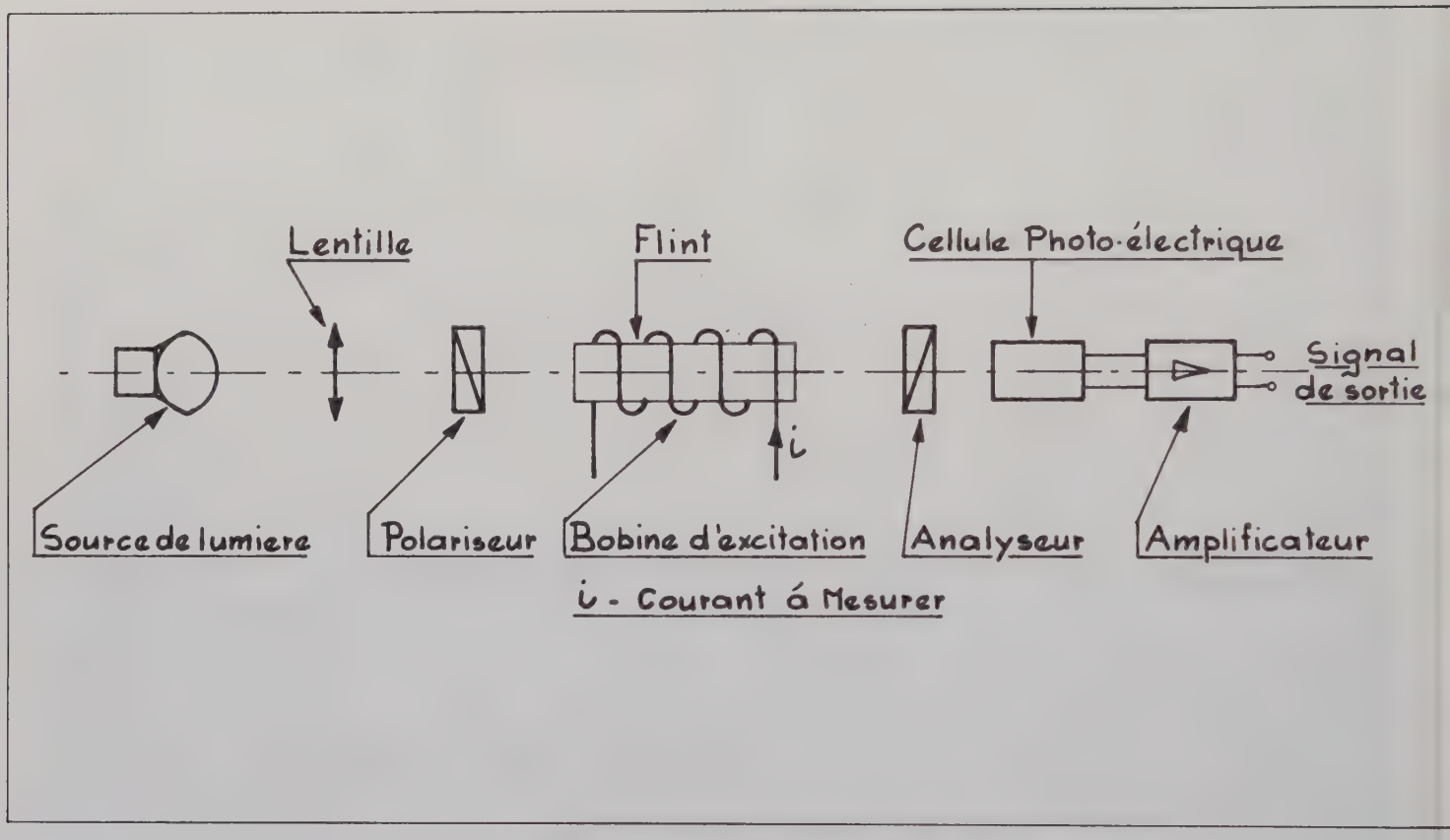


Fig. 5.21. - Mesure du courant à l'aide de l'effet Faraday
(schéma de principe)

5.3. mesure des courants post-arc à l'aide de l'effet Faraday

5.3.1. introduction

Le principe de mesure des courants à l'aide de l'effet Faraday a été déjà utilisé, par Monsieur HÉROIN[13] de l'Electricité de France et par Messieurs BERNARD et PELENC[22] de MERLIN GERIN, dans la réalisation d'un transformateur de courant à effet magnéto-optique. Les travaux de ces derniers ont été orientés surtout vers une utilisation industrielle de ce principe, pour mesurer les forts courants à haute tension. La faible sensibilité et la très faible bande passante de leur appareil ne nous permet pas de l'utiliser pour mesurer les courants post-arc.

Toutefois, ce sont leurs travaux qui nous ont permis d'entreprendre la recherche sur l'application de ce principe pour mesurer les courants de faibles valeurs et nous ont encouragé à développer un dispositif tout à fait adaptable pour mesurer les courants post-arc.

5.3.2. Rappel de l'effet Faraday

L'effet Faraday consiste en une rotation du plan de polarisation d'un faisceau lumineux sous l'action du champ magnétique parallèle au sens de propagation des rayons lumineux. Cette action est plus ou moins forte selon les substances dans lesquelles le phénomène se produit. La rotation est proportionnelle à la différence de potentiel magnétique et suit la loi de Verdet qui peut s'écrire sous la forme:

$$\alpha = \rho \, . \, L \, . \, H \qquad (72)$$

α : angle dont a tourné le plan de polarisation

H : champ magnétique

ρ : constante de Verdet pour le milieu envisagé.

L : longueur du trajet sur lequel s'exerce l'effet du champ magnétique.

La constante de Verdet, ρ est une grandeur qui dépend à la fois du milieu traversé par la lumière et de la longueur d'onde de celle-ci.

Donc, pour un milieu donné et une radiation monochromatique, ρ est constante. De même, pour un spectre lumineux fixe, ρ prendra une valeur moyenne fixe tant que la composition de la lumière ne changera pas.

5.3.3. dispositif expérimental de principe.

Le montage de principe comprend, alignés sur un même axe optique (Fig.5.21): une source de lumière, une lentille, un polariseur, le corps actif qui, dans notre cas, est un bloc de flint lourd entouré de sa bobine d'excitation, un analyseur calé à 45° par rapport au polariseur, et une cellule photoélectrique munie de son alimentation.

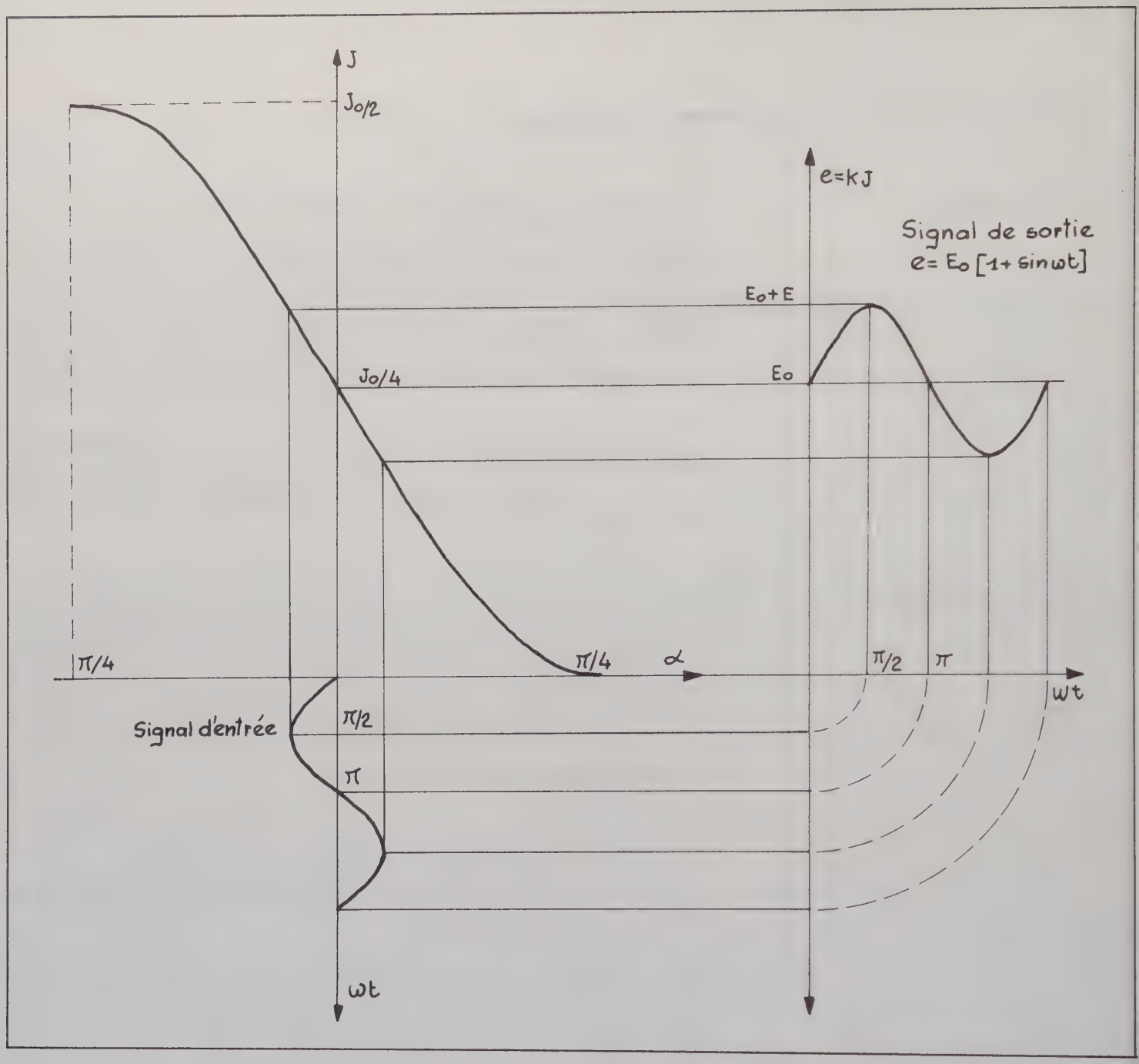


Fig. 5.22 - Mesure du courant à l'aide de l'effet Faraday
Caractéristiques de fonctionnement

1. fonctionnement

Soit J_o l'intensité lumineuse de la source. Après la traversée du polariseur, l'intensité du faisceau sera de $J_o/2$. Hors de la présence du champ d'induction magnétique et négligeant les absorptions, on trouvera, après la traversée de l'analyseur, une intensité lumineuse égale (d'après la loi de Malus) à:

$$J = \frac{J_o}{2} \cos^2 \frac{\pi}{4} = \frac{J_0}{4} \tag{73}$$

Si on établit un champ d'induction magnétique dans le flint, le plan de polarisation de la lumière va tourner d'un angle α.

L'intensité lumineuse après la traversée de l'analyseur sera:

$$J = \frac{J_0}{2} \cos^2 (\frac{\pi}{4} + \alpha) \tag{74}$$

$$= \frac{J_0}{4} (1 - \sin 2\alpha)$$

2. caractéristiques de fonctionnement

La caractéristique de fonctionnement pourrait être bien expliquée par la construction graphique représentée dans la figure 5.22.

On trace sur un diagramme la courbe représentative de l'équation (74) en portant l'intensité lumineuse sur l'axe positif des ordonnées et les angles α en abscisse. L'angle α est relié au champ d'induction magnétique par l'équation (72).

Par suite, l'axe des abscisses peut être gradué en induction ou en courant engendrant ce champ d'induction. L'axe négatif des ordonnées sera gradué en temps avec une échelle arbritaire. Dans ce dernier demi-plan, on tracera la courbe représentative du signal d'entrée.

Si le détecteur photoélectrique possède une tension de sortie qui est une fonction linéaire de l'intensité lumineuse, on pourra graduer l'axe de J en tension de sortie: $e = KJ$. Pour la commodité de la représentation, on définira un autre quadrant où le signal de sortie sera porté sur un axe d'ordonnée parallèle à l'axe de J et le temps sur l'axe des abscisses avec une échelle identique à l'échelle du signal d'entrée.

Le signal de sortie se présentera sous la forme $e = E_o (1 + \sin \omega t)$. On est donc amené à supprimer la composante E_o en ajoutant une tension E_o dans le circuit d'utilisation. Le réglage de tension E_o s'effectue avant les essais par une méthode de zéro.

3. condition de linéarité

L'examen de la formule (74) montre que le signal de sortie sera linéaire tant que l'on pourra assimiler le sinus à l'arc, ce qui limite l'angle de rotation du plan de polarisation à une dizaine de degrés.

4. sensibilité de la détection optique

Comme nous l'avons vu, la cellule photoélectrique, par le fait que l'on emploie une méthode de zéro, n'a pas à apprécier la valeur de l'information qu'elle reçoit, mais essentiellement à détecter une variation de celle-ci.

Le problème de la précision de mesure est donc ramené, en ce qui concerne la cellule photoélectrique, à l'étude de sa sensibilité dans l'ensemble où elle se trouve.

Le flux sortant de l'analyseur, qui fait l'angle α avec l'axe optique du polariseur sera:

$$J = \frac{J_0}{2} \cos^2 \alpha \tag{75}$$

$$dJ = - J_0 \cos \alpha \sin\alpha \, d\alpha \tag{76}$$

$$\text{et} \quad \frac{d_2 J}{d\alpha^2} = J_0 (\sin^2\alpha - \cos^2\alpha) \tag{77}$$

Pour que la sensibilité soit maximale, il faut que la variation de flux soit maximale pour une petite variation d'angle donné c'est-à-dire $\frac{d^2 J}{d\alpha^2} = 0$

ce qui donne

$$\alpha = \frac{\pi}{4} + K\frac{\pi}{2} \tag{78}$$

Cette relation indique que les axes de l'analyseur et du polariseur devront présenter entre eux un angle de 45°. Donc nous pouvons écrire

$$dJ = - J_0 \frac{\sqrt{2}}{2} \times \frac{\sqrt{2}}{2} d\alpha = -\frac{J_0}{2} \, d\alpha \tag{79}$$

Le signe moins indique que le flux diminue lorsque α augmente, et réciproquement. Nous en ferons abstraction dans la suite des calculs.

La cellule devra détecter ces variations de flux en présence d'un flux permanent J

La sensibilité de la cellule devient:

$$\frac{dJ}{J} = \frac{J_0/2 \, d\alpha}{J_0/2 \cos^2\alpha} = 2 \, d\alpha \tag{80}$$

L'angle α varie de $d\alpha$ sous l'action du champ magnétique créé par le courant dans la bobine

D'après l'équation 72,

$$\alpha = \rho L H$$
$$\text{avec } LH \# NI$$
$$\alpha = \rho NI$$
$$d\alpha = \rho N dI \tag{81}$$

Si k est la précision de mesure c'est-à-dire $k = \frac{dI}{I}$ (82), on peut écrire

$$\frac{dJ}{J} = 2\rho . N I K^{I} \tag{83}$$

dJ est la variation minimale de lumière détectable. Elle doit être supérieure au bruit de fond de la cellule qui est mesurable $\frac{dJ}{J}$ est la sensibilité de la cellule donnée par le constructeur. On peut en déduire le nombre de spires N pour mesurer le courant I avec une précision k.

5.3.4. perturbation de fonctionnement

1. origines de perturbations

La mesure du courant par ce dispositif sera fortement perturbée par la variation involontaire d'origine mécanique ou électrique de l'intensité lumineuse J_o. Les perturbations d'origine mécanique peuvent être atténuées par un montage mécanique rigide.

Les perturbations électriques dues aux variations de la tension alimentant la lampe se traduisent par une variation de flux lumineux interprétée comme une mesure par la cellule photoélectrique.

2. compensation électro-optique

Une perturbation affecte réellement l'intensité du faisceau alors qu'une mesure ne le fait qu'à travers les deux polariseurs croisés. Par conséquent, une mesure ne peut être vue qu'à travers des polariseurs, tandis qu'une perturbation est détectée qu'il y ait ou non un analyseur.

Donc, on dispose non plus d'une mais de deux cellules photoélectriques. L'une d'elles reçoit la lumière avant son passage à travers l'analyseur, l'autre après.

Les deux cellules doivent être montées en opposition électrique. La sortie totale sera la différence des signaux reçus et ainsi le signal de sortie interprétera uniquement les mesures. Si nous disposons deux cellules, montées en opposition, l'une derrière un analyseur à 45°, l'autre derrière un analyseur à 135°, on peut montrer que le signal de sortie sera deux fois plus grand que si l'on utilisait une seule cellule, les perturbations, par contre, s'annulent.

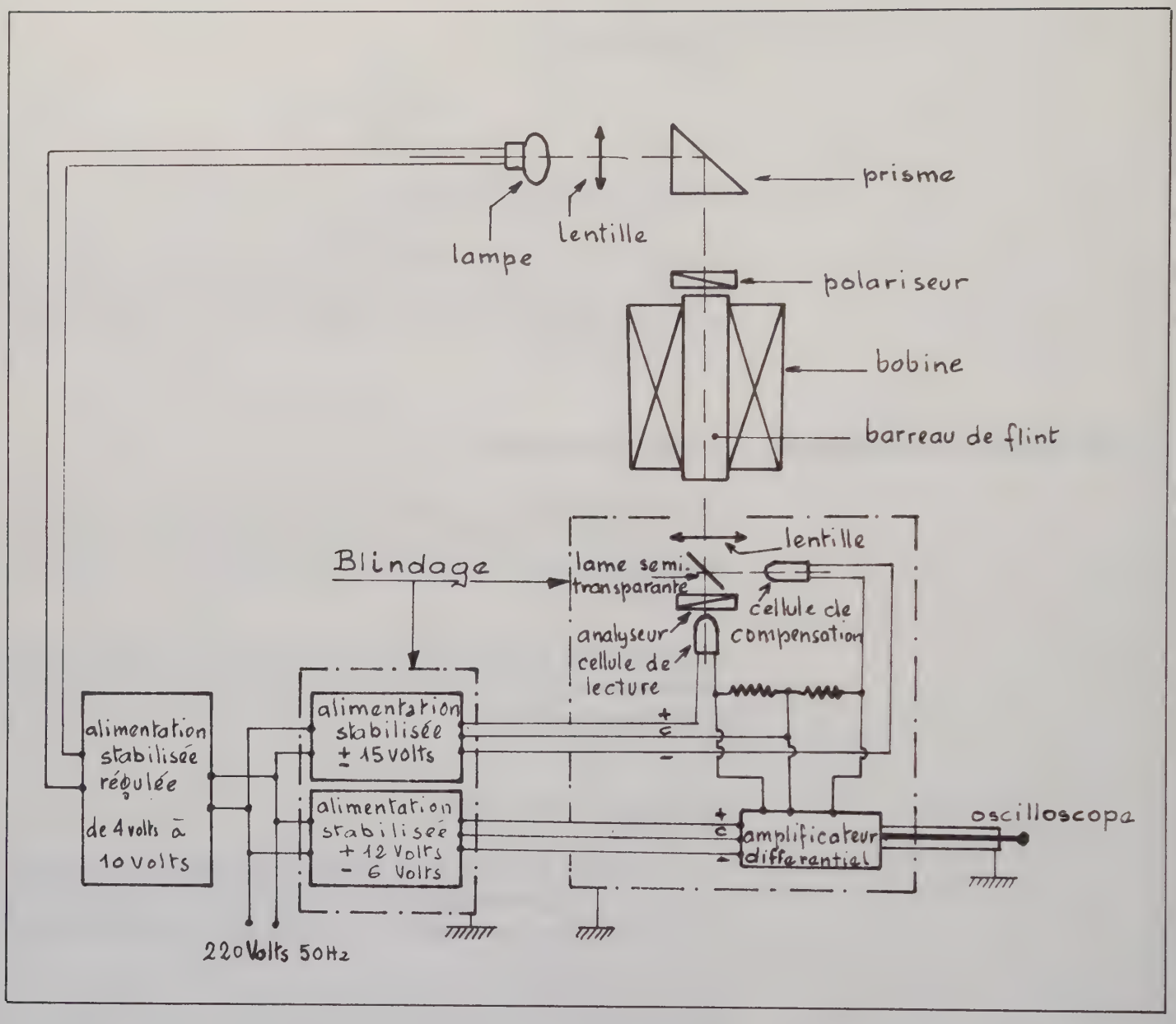


Fig. 5.23. - Schéma du dispositif de mesure du courant post-arc à effet Faraday

5.3.5 réalisation de l'appareil

L'appareil que nous avons mis au point se rapproche considérablement du dispositif expérimental de principe. Le schéma de l'appareil est représenté dans la figure 5.23.

1. choix des éléments

1.a. émission de la lumière

Nous avons choisi comme source de lumière une lampe de projection cinématographique à filament, avec réflecteur incorporé, 12 volts, 100 watts, référence Mazda 18.100.

Cette lampe sous-alimentée émet dans des longueurs d'onde qui concordent parfaitement avec la réponse spectrale des moyens de réception.

La lampe choisie avec son réflecteur incorporé offre un grand angle solide d'utilisation.

1.b. réception de la lumière

Le moyen de réception doit avoir les caractéristiques suivantes:
. Un faible bruit de fond
. Une sensibilité élevée
. Une réponse spectrale concordant avec les longueurs d'onde émises par la source de lumière.
. Une bande passante aussi élevée que possible.

Nous avons choisi la cellule photoélectrique au silicium de type BPY 13. La cellule BPY 13 est l'une des plus sensibles; sa réponse spectrale concorde parfaitement avec les longueurs d'onde émises par la lampe sous-alimentée.

Sa bande passante (donnée par le constructeur) est supérieure à 1 MHz.

1.c. milieu dans lequel s'exerce l'effet Faraday

Il doit posséder un indice de Verdet important, et être transparent aux rayons infra-rouges. Nous avons choisi le flint lourd comme milieu, pour sa haute transparence aux rayons infra-rouges et son indice de Verdet élevé. A titre indicatif $\rho = 20$ rad/Ts/m.[6]

1.d. polariseur

Nous avons choisi les polariseurs artificiels «polaroïd» pour leur grande ouverture et surtout pour la facilité de leur mise en place: Seule, leur absorption est un peu gênante.

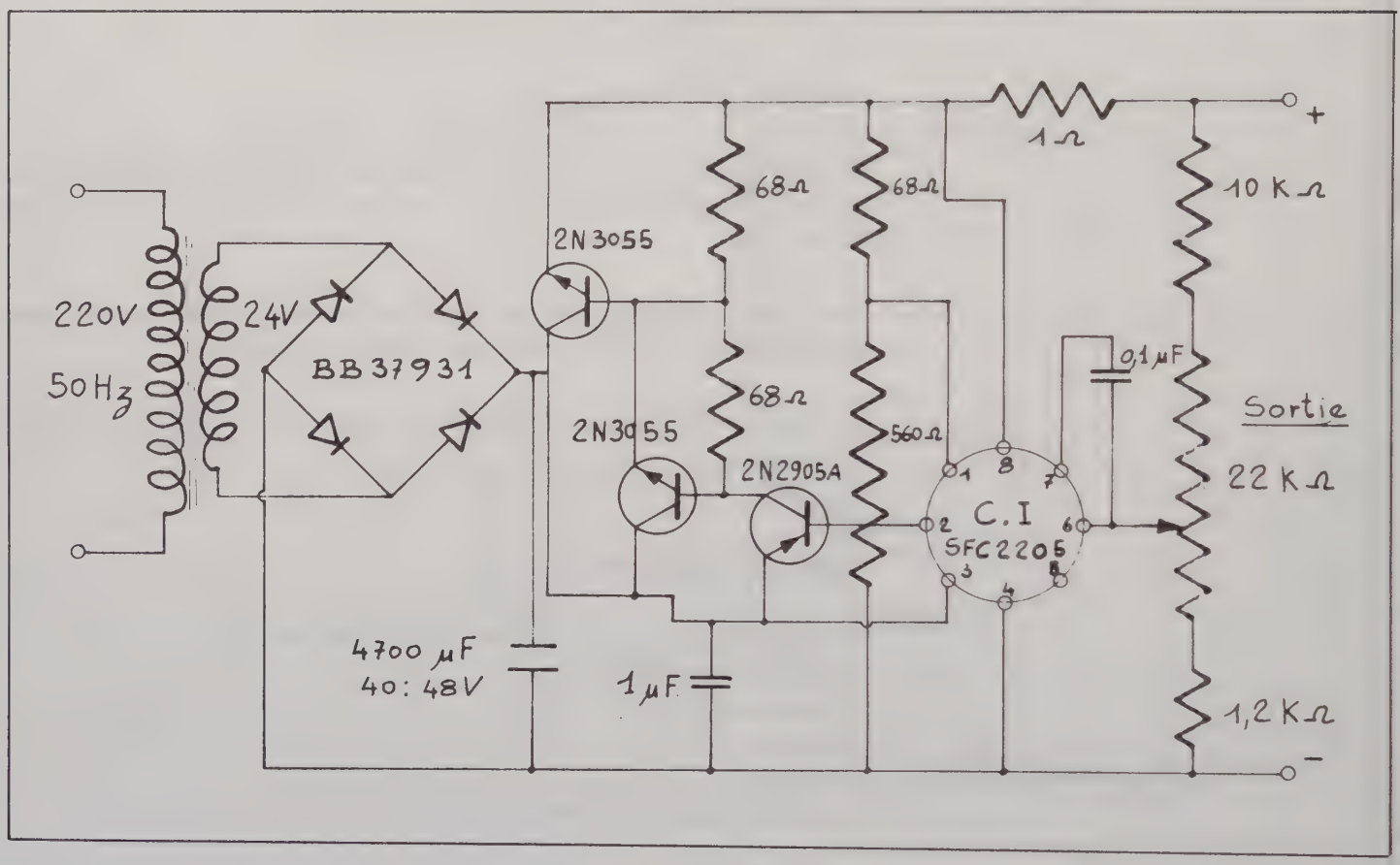


Fig. 5.24. - Alimentation de la lampe

2. ensemble électronique associé

Il est essentiellement constitué par:

. Une alimentation de la lampe
. Une alimentation des cellules
. Un ensemble amplificateur.

2.a. alimentation de la lampe

La lampe est alimentée à partir d'une alimentation stabilisée. La figure (5.24) montre le schéma électrique de l'alimentation stabilisée. Les caractéristiques principales sont les suivantes:

. Tension d'alimentation secteur: 220 volts 50 Hz (± 10%)
. Tension de sortie (V_s): réglable de 1,5 V à 12 V
. Intensité de sortie I max: 8A
. Stabilité secteur

$$\frac{\Delta v_s}{v_s} \; \Delta v \text{ secteur} \pm 10\% \quad : 8 \times 10^{-4}$$

. Stabilité en fonction des variations de charge $\frac{\Delta v_s}{v_s}$ pour ΔI de 0 à 100 % de I_{max} : 4×10^{-3}
. Ondulation résiduelle: 4 mV crête à crête
. Protégé contre le court-circuit.

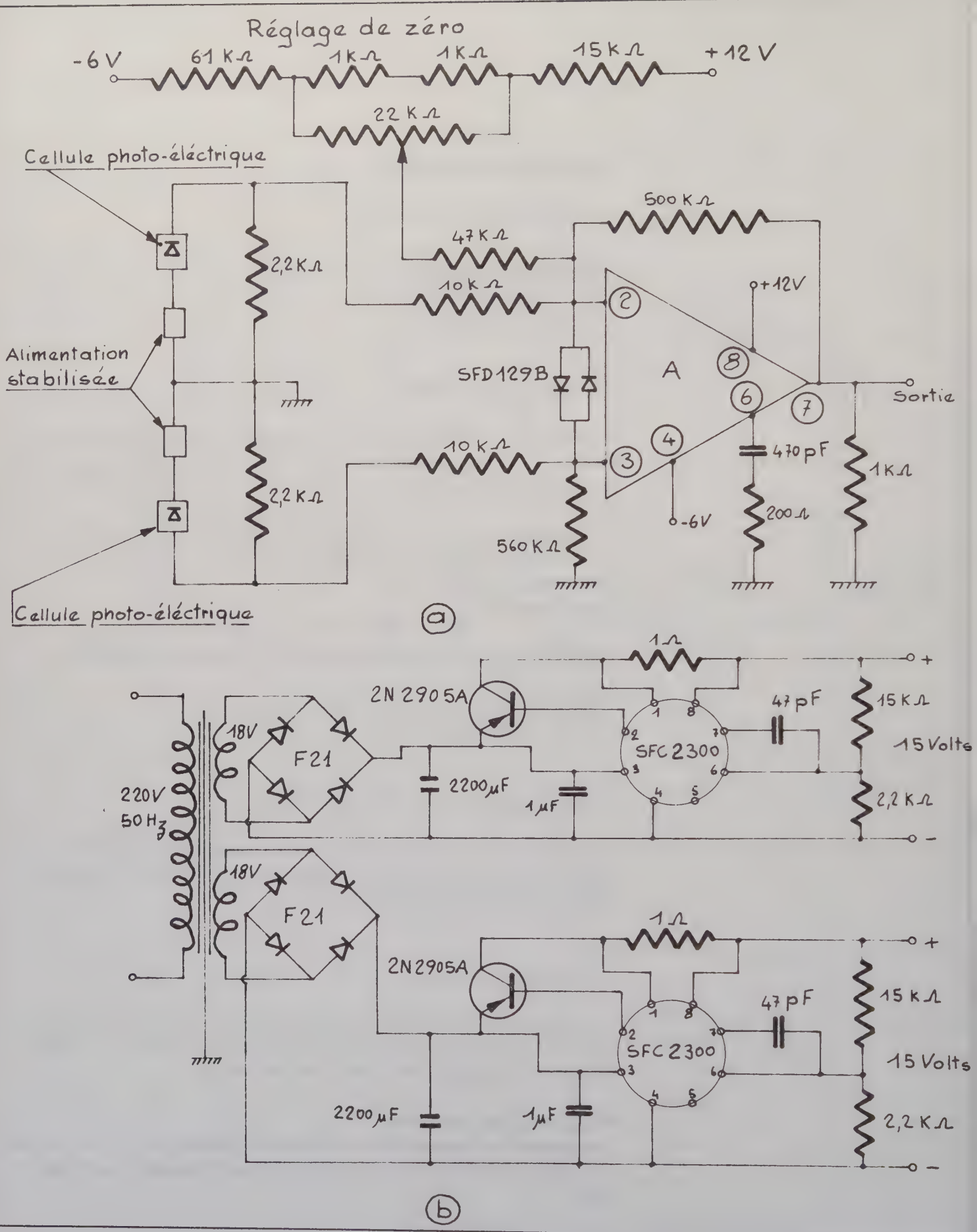
2.b. alimentation des cellules photo-électriques

Les cellules sont alimentées à partir d'une alimentation stabilisée de ± 15 volts. Le taux d'ondulation est inférieur à un pour mille. La réalisation de l'alimentation stabilisée est présentée dans la figure 5.25a

2.c. ensemble amplificateur

Le signal de sortie des deux cellules photoélectriques (Fig. 5.25b) est amplifié à l'aide d'un amplificateur . La réponse en fréquence de l'amplificateur est identique à celle de l'amplificateur décrit en 5.2.5.2.b., voir Fig. 5.16.

• *alimentation de l'amplificateur*
L'amplificateur est alimenté par une alimentation stabilisée de + 12 V et −6 V (voir Fig. 5.15b). L'alimentation est très stable et le taux d'ondulation est inférieur à 0,2%.



108

Fig. 5.25. - a - Amplificateur
b - Alimentation des cellules photo-électriques

5.3.6. caractéristiques principales de l'appareil

1. bande passante

Le comportement en fréquence du dispositif de mesure du courant à effet Faraday dépend:
. du comportement en fréquence du milieu dans lequel s'exerce l'effet Faraday
. de la bande passante des cellules photoélectriques
. de la bande passante de l'amplificateur.

1.a. temps d'établissement de l'effet Faraday

On a tenté de mesurer [13] le temps d'établissement de l'effet Faraday en utilisant des ondes de choc. Bien que la réponse soit fortement affectée par le bruit du photo-détecteur, on peut estimer que le temps d'établissement est largement inférieur à la microseconde.

1.b. bande passante des cellules photo-électriques

Les cellules photo-électriques (BPY13) que nous avons utilisées ont une bande passante de 1 MHz[25]. Nous avons vérifié leur réponse en fréquence en les soumettant à la lumière d'une diode électroluminiscente alimentée à partir d'une source à fréquence variable.

1.c. bande passante de l'amplificateur

La bande passante de l'amplificateur que nous avons utilisé est supérieure à 1 MHz (Voir Fig. 5.16).
La liaison entre cellules photoélectriques, leur alimentation et l'amplificateur doit être aussi courte que possible. La capacité introduite par les longs câbles de liaison peut fortement influencer la bande passante du dispositif. Nous avons obtenu les meilleurs résultats en mettant le dispositif électronique tout près des cellules.

2. sensibilité et capacité de surcharge

Le dispositif est capable de mesurer les courants post-arc de l'ordre de 1 A. Il peut être surchargé (40 kA), sans que soit affectée la qualité de la mesure immédiatement après la disparition de la surcharge.

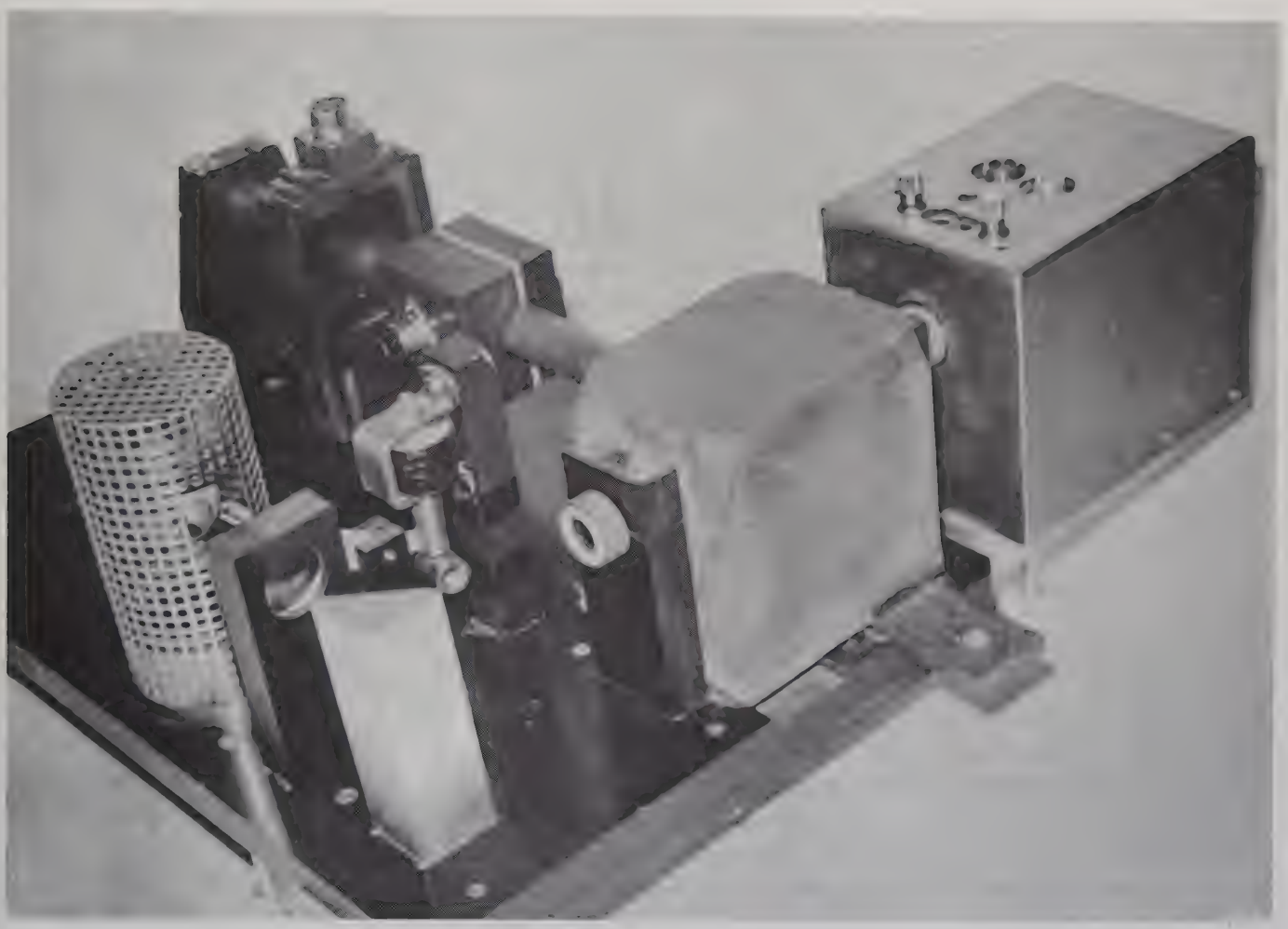


Fig. 5.26. - Dispositif de mesure du courant post-arc à effet Faraday
Appareil réalisé

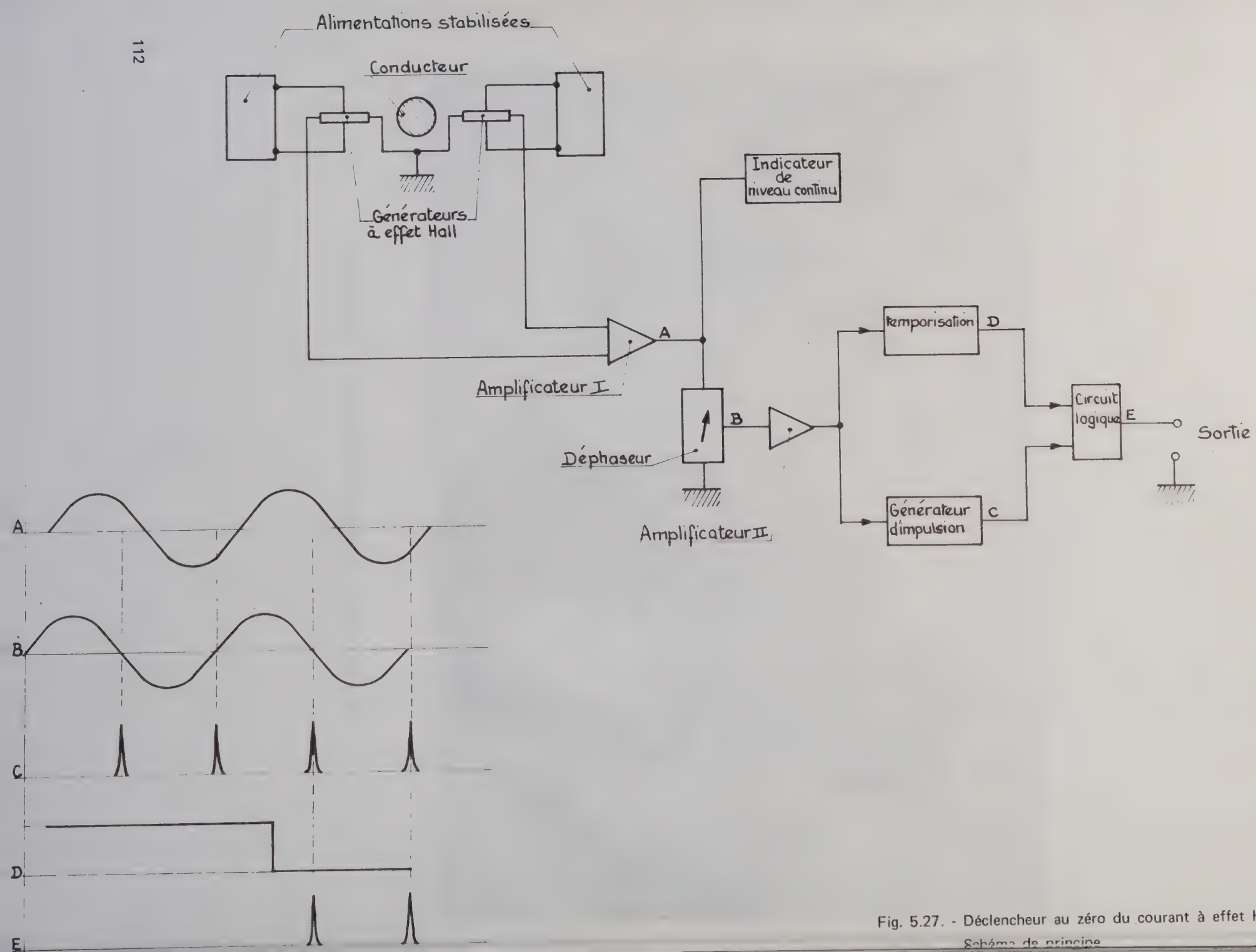


Fig. 5.27. - Déclencheur au zéro du courant à effet Hall
Schéma de principe

3. isolement à la masse

Le dispositif à effet Faraday est l'appareil par excellence pour ce genre de mesure. En effet l'information est transmise par un rayon lumineux qui peut être rendu aussi long qu'il est nécessaire. Dans la version actuelle, notre dispositif présente une tension d'isolement de 3 kV eff.

5.4. déclencheur au zéro de courant

5.4.1. introduction

Pour enregistrer les phénomènes post-arc sur un oscilloscope, il faut déclencher son balayage à un instant précis, quelques microsecondes avant le dernier passage au zéro de courant. Ceci nécessite un dispositif de déclenchement dont le fonctionnement est lié au zéro du courant.

5.4.2. déclencheur au zéro du courant à effet Hall

Nous avons mis au point un dispositif de déclenchement au zéro du courant dont le fonctionnement est représenté par la figure 5.27.

1. principe de fonctionnement

Le courant provenant du circuit à étudier est détecté à l'aide d'un générateur à effet Hall placé autour du conducteur véhiculant le courant. Pour éliminer l'influence des champs magnétiques extérieurs, on utilise deux générateurs à effet Hall branchés en opposition du côté tension et qui sont alimentés séparément avec un courant constant. La tension de sortie est amplifiée à l'aide d'un amplificateur. Cette tension amplifiée donne une image fidèle du courant principal. Pour produire une impulsion avant le passage au zéro du courant, il est nécessaire d'utiliser un système de déphasage qui donne un signal en avance par rapport au courant à étudier. Dans ce but, nous avons utilisé un circuit constitué d'une résistance R et d'une inductance L en série avec la charge résistive de l'amplificateur. La tension aux bornes du circuit RL (Voir Fig. 5.28) provoquée par le courant de sortie de l'amplificateur, est en avance par rapport au signal d'entrée de l'amplificateur (signal à B). Les impulsions produites par le circuit du générateur d'impulsion à partir de ce signal déphasé sont en avance à chaque passage au zéro du courant.

Pour éviter les déclenchements inutiles de la base de temps de l'oscilloscope à chaque passage au zéro du courant., nous avons utilisé un dispositif qui est composé d'un temporisateur et d'un circuit logique. Ce circuit logique bloque toutes les

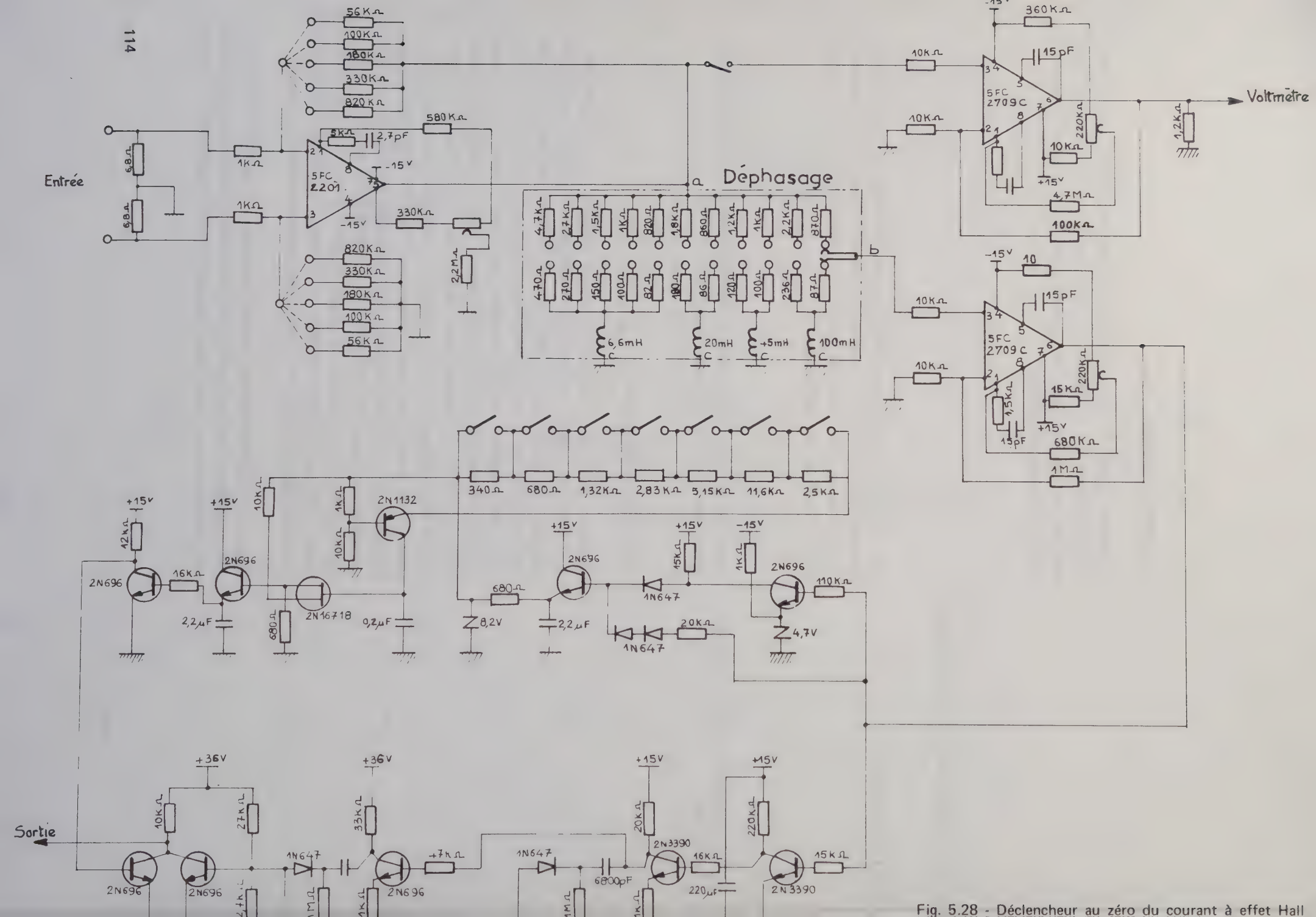


Fig. 5.28 - Déclencheur au zéro du courant à effet Hall

impulsions pendant un temps T déterminé par le temporisateur (l'instant de mise en circuit du courant est pris comme le point de référence pour fixer le temps T). La première impulsion qui apparaît à la sortie après le temps T est utilisé pour déclencher le balayage de l'oscilloscope. Pour les valeurs faibles du courant, les générateurs à effet Hall sont placés dans l'entrefer d'un circuit magnétique entourant le conducteur.

2. réalisation de l'appareil

La figure 5.29 présente l'appareil réalisé. Le capteur pour détecter le courant est réalisé en utilisant les générateurs à effet Hall de type SIEMENS FA24. Les deux générateurs sont alimentés à partir de deux alimentations stabilisées identiques à celles que nous avons décrites en 5.2.5.2.a. La liaison entre le capteur et le déclencheur est faite par un câble spécial (Voir Fig. 5.17).

3. caractéristiques principales

Tension d'alimentation : 220 V, 50 Hz (± 10%)
Gamme de courants: de 100 A à 40 kA
Déphasage: de 0 à 1 ms
Dispersion sur le déphasage: 5%
Amplitude crête de l'impulsion: 36 V
Temps de montée de l'impulsion: 2 μs
Tension d'isolement du capteur: 1 kV eff.

4. avantages

Cet appareil présente de nombreux avantages; il est:
. Compact
. Statique
. n'a pas besoin de contact auxiliaire pour synchroniser le fonctionnement avec l'ouverture du disjoncteur
. très facile à mettre en service
. fonctionne aussi bien sur les courants symétriques que sur les courants asymétriques
. il isole le circuit de mesure du circuit principal.

Fig. 5.29. - Déclencheur au zéro de courant à effet Hall
Appareil réalisé

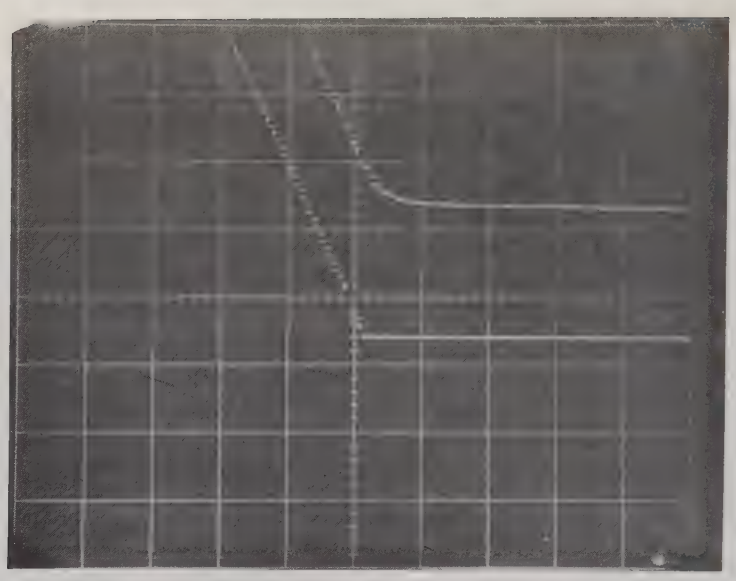


Fig. 6.1. - Influence de la bande passante du dispositif de mesure
échelle : courant : 4 A/cm
temps : 100 μs/cm
Courbe supérieure : mesure par le dispositif à effet Hall ayant une bande passante de 80 kHz
Courbe inférieure : mesure par le dispositif à effet Hall ayant une bande passante de 1 MHz

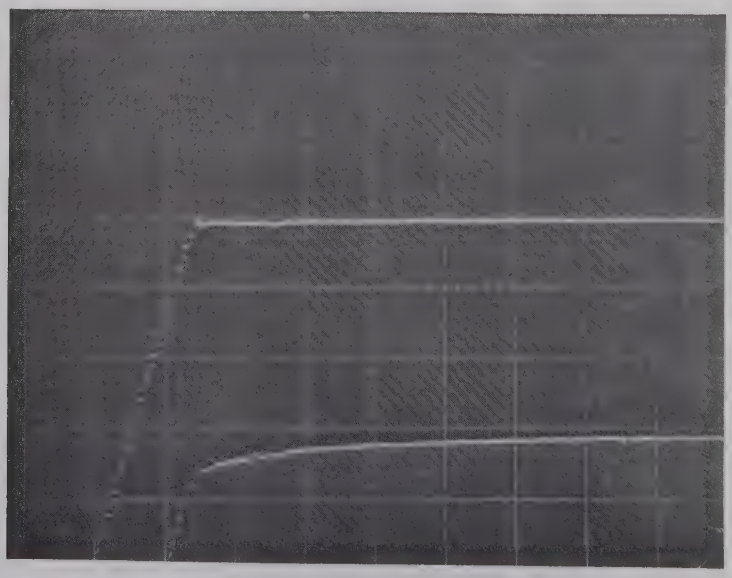


Fig. 6.2. - Influence d'une dérive de zéro
échelle : courant : 4 A/cm
temps : 100 μs/cm
Courbe supérieure : mesure par le dispositif muni d'un écrêteur
Courbe inférieure : mesure par le dispositif sans écrêteur

6. RESULTATS EXPERIMENTAUX

6.1. essais de mise au point

6.1.1. bande passante trop faible

La figure 6.1 montre les enregistrements oscillographiques du courant à l'aide de deux dispositifs à effet Hall qui ont une bande passante différente.

La mesure 1 est réalisée avec le dispositif ayant une bande passante de 80 kHz et la mesure 2 est réalisée avec le dispositif ayant une bande passante de 1 MHz.

On peut observer que, dans le premier cas, le courant est arrondi avant de venir au zéro. Dans le deuxième cas, le courant arrive au zéro normalement. L'arrondissement du signal dû à la faible bande passante risque de masquer les courants post-arc de courte durée.

6.1.2. dérives de zéro

Une importante dérive de zéro peut découler d'un signal trop grand à l'entrée de l'amplificateur. On peut l'éliminer en limitant la tension à l'entrée de l'amplificateur. La figure 6.2 indique les résultats d'essais pour vérifier la dérive de zéro. La mesure 1 est réalisée par le dispositif à effet Hall muni d'un écrêteur et la deuxième sans écrêteur.

6.1.3. signaux parasites

L'enregistrement du courant à l'aide du dispositif à effet Faraday est indiqué dans la figure 6.3. La liaison du capteur à l'oscilloscope a été réalisée par un câble coaxial. La tension transitoire de rétablissement agissant sur la capacité formée par l'appareil et le câble de liaison par rapport à la terre, peut introduire dans celle-ci un courant oscillatoire superposé au signal à mesurer.

Un blindage approprié de l'appareil et de la liaison entre le capteur et l'oscilloscope à l'aide d'un câble bifilaire blindé peut éliminer ce signal parasitaire comme l'indique la figure 6.4.

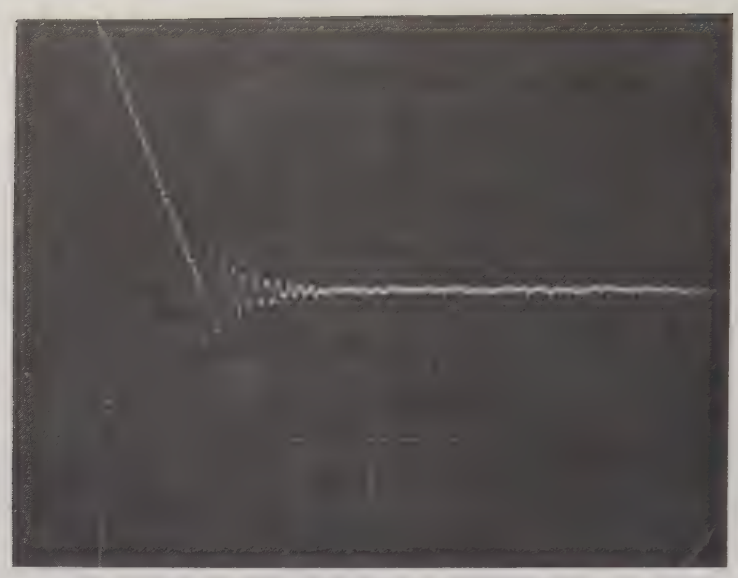


Fig. 6.3. - Mesure du courant à l'aide de l'effet Faraday
(Influence de la tension transitoire de rétablissement)
échelle : courant : 2 A/cm
temps : 50 μs/cm
courant principal : 780 A (eff.)

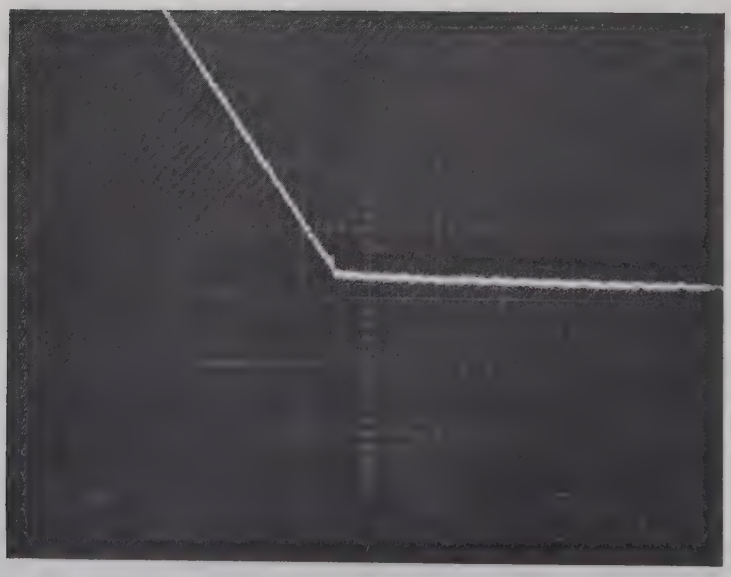


Fig. 6.4. - Mesure du courant à l'aide de l'effet Faraday
efficacité du blindage
échelle : courant : 2 A/cm
temps : 50 μs/cm

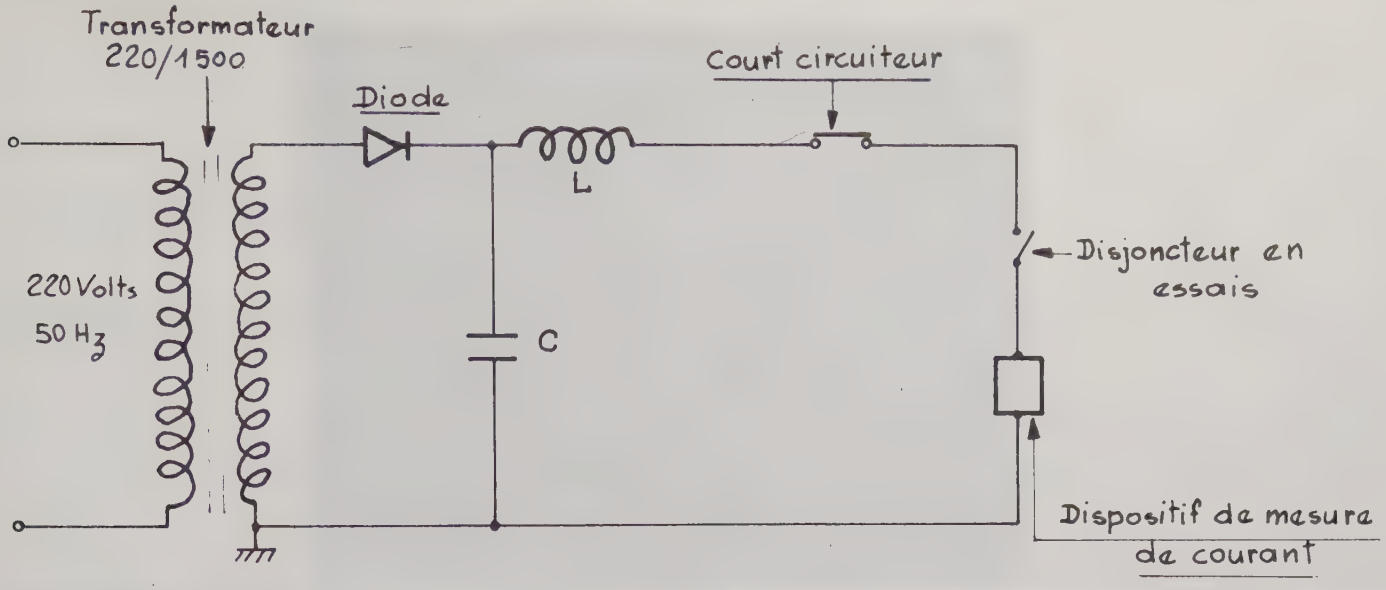
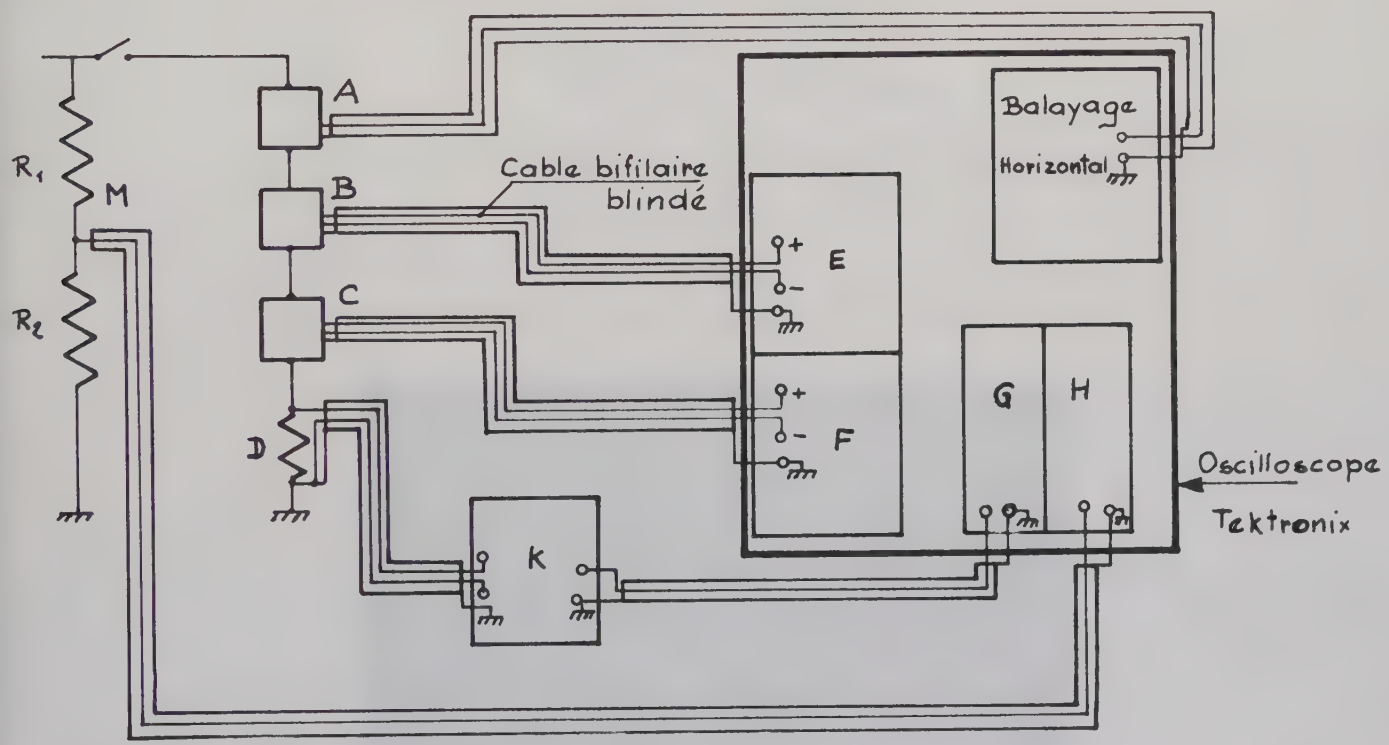


Fig. 6.5. - Schéma du circuit d'essais



A Déclencheur au zéro du courant
B Dispositif à effet Hall
C Dispositif à effet Faraday
D Shunt
E, F Amplificateur différentiel monté sur l'oscilloscope
K Amplificateur différentiel muni d'un écrêteur
G, H Amplificateur simple monté sur l'oscilloscope
M Diviseur de tension

Fig. 6.6. - Disposition des appareils de mesure

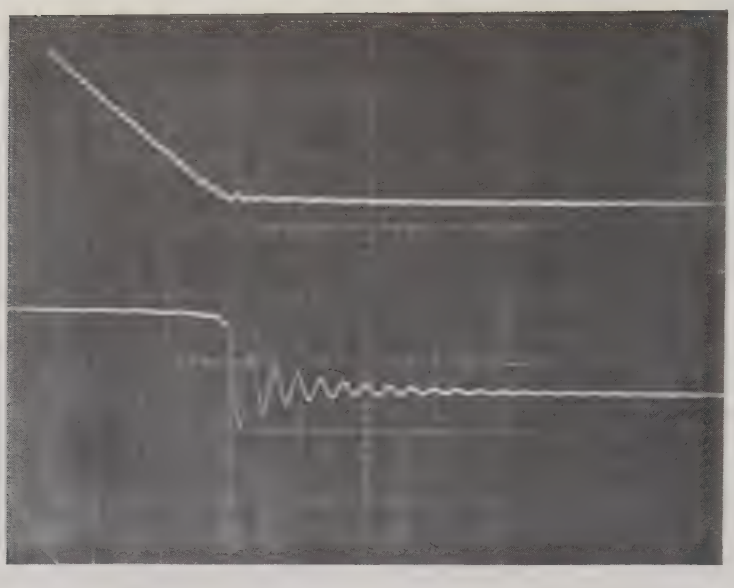


Fig. 6.7. - Mesure du courant à l'aide du dispositif à effet Hall
échelle : courant : 4 A/cm
tension : 200 V/cm
temps : 20 μs/cm
courant principal : 1000 A (crête)

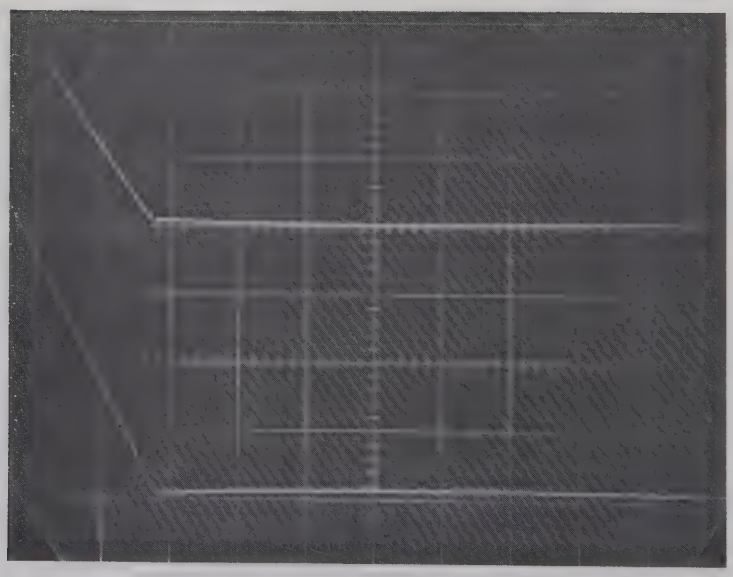


Fig. 6.8. - Mesure simultanée du courant avec le dispositif à effet Hall et le dispositif à effet Faraday
échelle :
. courbe supérieure : 6 A/cm (mesure par le dispositif à effet Hall)
. courbe inférieure : 4 A/cm (mesure par le dispositif à effet Faraday)
temps : 50 μs/cm
courant principal : 1200 A (crête)

6.2. vérification de performance des dispositifs de mesure

6.2.1. circuit d'essais

Nous avons réalisé les essais de coupure sur un disjoncteur prototype à SF_6. Les conditions actuelles d'essais de coupure sont simulées dans le laboratoire autonome dont le principe de fonctionnement est indiqué dans la figure 6.5. Le courant nécessaire est fourni par le circuit oscillant dont la fréquence est déterminée par l'inductance L et la capacité C. Dans notre cas, la fréquence est 47 Hz. La disposition de l'appareil de mesure est indiquée dans la figure 6.6.

6.2.2. résultats d'essais de performance des dispositifs de mesure

La figure 6.7 montre l'enregistrement du courant par le dispositif à effet Hall. La tension aux bornes des contacts de l'appareil est mesurée à l'aide d'un diviseur résistif.

On remarque que le courant arrive au zéro normalement et reste au zéro, la coupure étant réussie.

La tension passe par zéro en même temps que le courant. On ne note aucune oscillation parasite de courant. Le courant principal est de 1000 A (crête). La sensibilité de mesure est de 4 A/cm.

La figure 6.8 indique les enregistrements simultanés effectués par le dispositif à effet Hall et le dispositif à effet Faraday.

On constate que les deux courants arrivent au zéro de la même façon. Il n'y a aucun déphasage entre eux. Le courant principal est 1200 A. La sensibilité de mesure est 6 A/cm pour le dispositif à effet Hall et de 4 A/cm pour le dispositif à effet Faraday.

On constate un léger déplacement de zéro. Dans le cas du dispositif à effet Hall, ce déplacement est de 0,15 A, et dans le cas du dispositif à effet Faraday, cette erreur est de 0,2 A. Nous pouvons noter que cette erreur est presque négligeable par rapport au courant à mesurer.

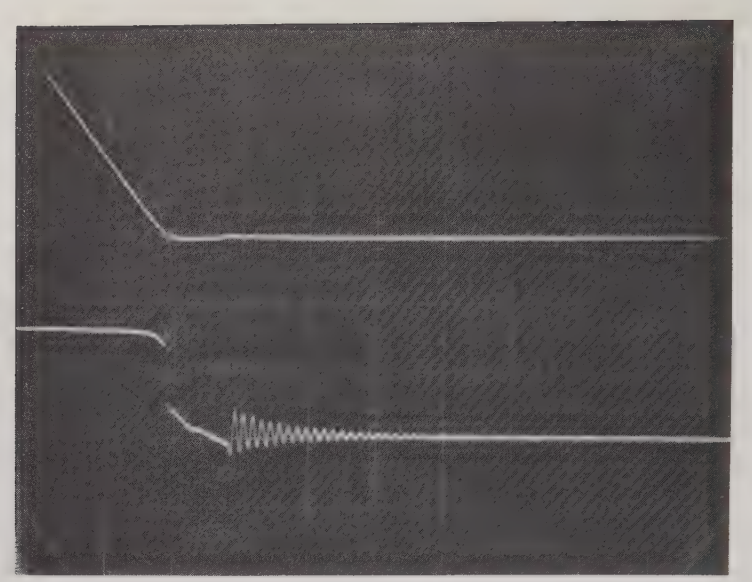


Fig. 6.9. - Mesure du courant post-arc
(mesure du courant par le dispositif à effet Hall)
échelle : courant : 6 A/cm
tension : 200 V/cm
temps : 50 μs/cm
courant principal : 1000 A (crête)

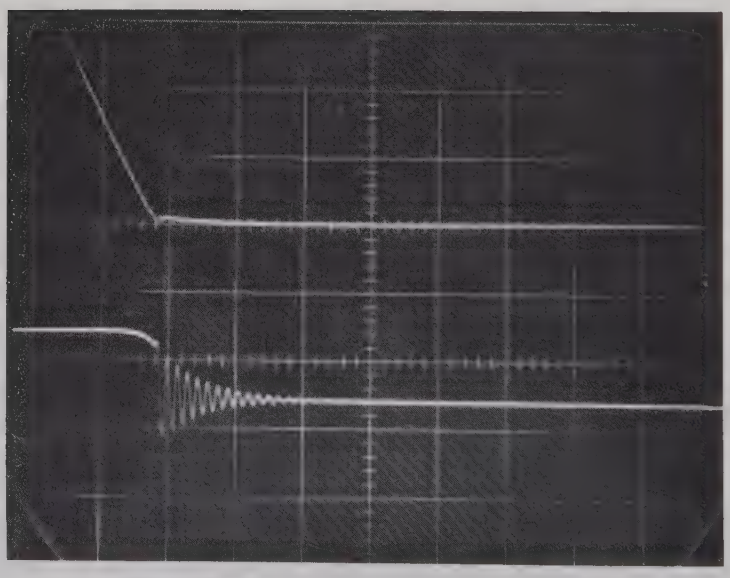


Fig. 6.10. - Mesure du courant post-arc
(l'apparition du courant post-arc)
échelle : courant : 6 A/cm
tension : 200 V/cm
temps : 50 μs/cm
courant principal : 1220 A (crête)

6.3. mesure des courants post-arc

Les figures Nos 6.9, 6.10, 6.11, 6.12 montrent les résultats obtenus au cours des essais de mesure des courants post-arc.

6.3.1. mesure du courant post-arc à l'aide du dispositif à effet Hall

Dans la figure 6.9, on constate que le courant à couper est de l'ordre de 1000 A et qu'aucun courant post-arc n'est produit. Le courant arrive au zéro normalement et reste au zéro, la coupure étant réussie, la tension passe par zéro en même temps que le courant et le régime libre est établi tout de suite.

Si nous augmentons le courant à couper de 1000 A à 1220 A (Fig.6.10), le courant post-arc fait son apparition. Le courant post-arc est de l'ordre de 0,5 A et il dure 45 μs. Dans la figure 6.11, le courant est de 1250 A et la tension de 620 V, on a environ 2 A de courant post-arc qui dure 135 μs.

Si nous augmentons le courant à couper à 1280 A, le courant post-arc dégénère en courant principal et il y a non-coupure (Fig. 6.12). Ceci nous indique clairement que le réallumage de l'arc est d'origine thermique.

On peut remarquer que la tension transitoire de rétablissement reste fortement amortie pendant la présence du courant post-arc. L'oscillation libre ne commence qu'à partir du moment où le courant post-arc devient nul.

La différence entre le courant principal pour lequel le courant post-arc fait son apparition et le courant entraînant en non-coupure est de l'ordre de 60 A. Donc nous pouvons dire que dans ce cas, l'apparition d'un courant post-arc donne une sorte d'alarme indiquant que l'appareil est à la limite de son pouvoir de coupure.

6.3.2. mesures simultanées des courants post-arc par les deux nouveaux dispositifs

La figure 6.13 indique l'enregistrement simultané du courant post-arc à l'aide du dispositif à effet Hall et le dispositif à effet Faraday. Cet essai a été réalisé avec deux contacts de l'appareil en série.

On remarque que les enregistrements obtenus par ces deux dispositifs sont identiques.

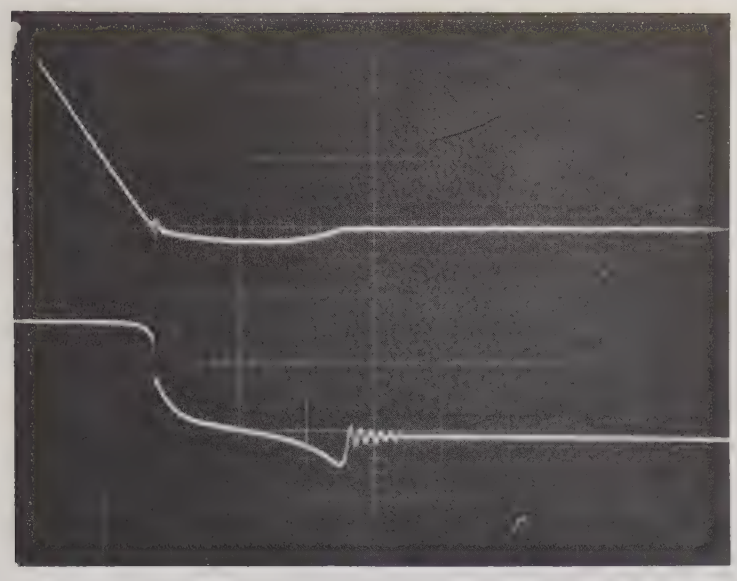


Fig. 6.11. - Mesure du courant post-arc
échelle : courant : 6 A/cm
tension : 200 V/cm
temps : 50 μs/cm
courant principal : 1250 A (crête)

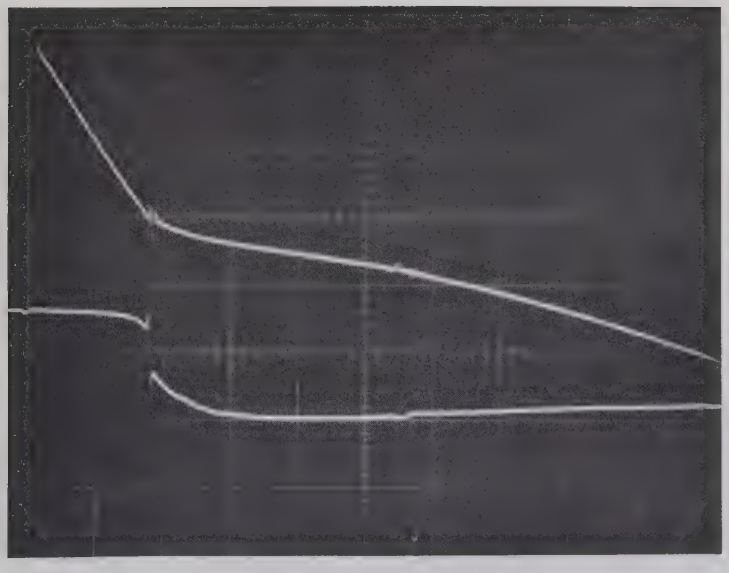


Fig. 6.12. - Mesure du courant post-arc
(non coupure)
échelle : courant : 6 A/cm
tension : 200 V/cm
temps : 50 μs/cm
courant principal : 1280 A (crête)

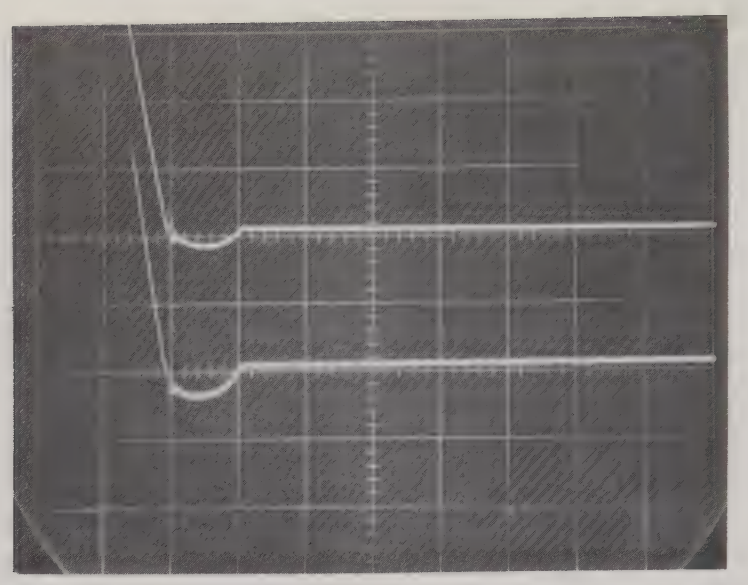


Fig. 6.13. - Mesures simultanées des courants post-arc par le dispositif à effet Hall et le dispositif à effet Faraday
échelle :
. courbe supérieure : 6 A/cm (mesure par le dispositif à effet Hall)
. courbe inférieure : 4 A/cm (mesure par le dispositif à effet Faraday)
temps : 100 μs/cm
courant principal : 3300 A (deux contacts en série)

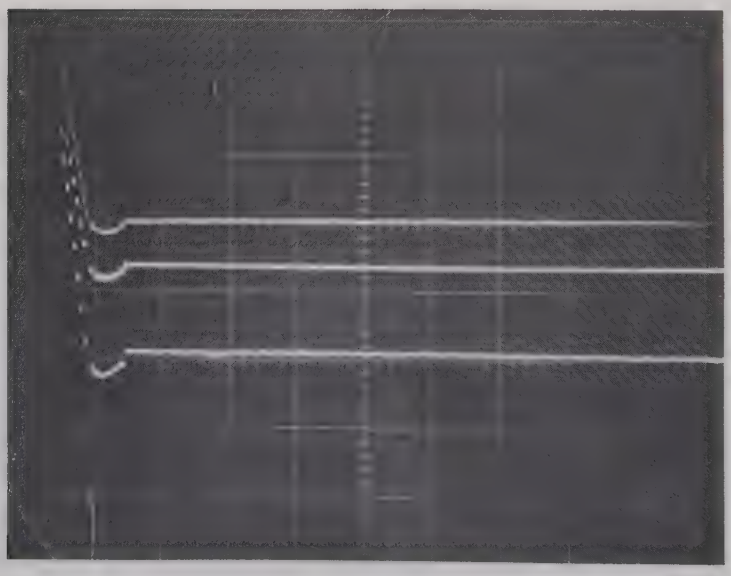


Fig. 6.14. - Mesures simultanées des courants post-arc par trois moyens de mesure différents
échelle :
. courbe supérieure : 6 A/cm (mesure par le dispositif à effet Hall)
. courbe médiane : 6 A/cm (mesure par le shunt)
. courbe inférieure : 4 A/cm (mesure par le dispositif à effet Faraday)
temps : 200 μs/cm
courant principal : 1250 A

6.3.3. comparaison des enregistrements du courant par les nouveaux dispositifs et un shunt

Il nous a paru intéressant de faire les mesures simultanées avec les nouveaux moyens de mesure que nous avons mis au point et un shunt à faible résistance.

Dans ce but, un shunt à faible résistance a été mis au point par le laboratoire d'essais synthétiques MERLIN GERIN. Ce shunt a une résistance de 1 mΩ et une constante de temps de 1 μs. Il peut supporter un courant de 15 kA pendant une seconde. La chute de tension aux bornes du shunt est amplifiée par un amplificateur différentiel muni d'un écrêteur. Les résultats des essais de mise au point ont déjà été présentés en 4.2.2.1.

Les résultats des essais sont indiqués dans la figure 6.14. Nous pouvons constater que les trois courants arrivent au zéro au même moment et ensuite donnent des courants post-arc de l'ordre de 2 A. Le courant post-arc dure environ 100 μs.

Les signaux enregistrés par le shunt et le dispositif à effet Faraday sont hachés. Cette hachure vient du découpage du faisceau cathodique de l'oscilloscope.

7. CONCLUSION

Nous venons d'étudier, en détail, sur les plans théorique et pratique, le problème du courant post-arc. Nous pouvons en déduire les conclusions suivantes:

La présence du courant post-arc dans les disjoncteurs est une réalité. Les mesures des courants post-arc exigent de l'appareil utilisé des conditions très particulières qui sont difficiles à remplir.

Le shunt qui a été le seul moyen convenablement utilisé jusqu'à maintenant, présente des difficultés dans sa réalisation et dans sa mise en œuvre. Il nécessite de prendre une série de précautions, faute de quoi on risque d'enregistrer des courants post-arc inexistants.

L'importance du problème du courant post-arc exige la mise en œuvre parallèle d'autres moyens de mesure.

Les nouveaux moyens de mesures, le dispositif à effet Hall et le dispositif à effet Faraday, donnent des résultats valables. Ces dispositifs sont capables de mesurer des courants de l'ordre de 1 A dont la durée est de quelques microsecondes. En même temps, ils peuvent supporter un courant de court-circuit de 40 kA. De plus, ils présentent l'avantage primordial d'isoler le circuit de mesure du circuit principal. Ils sont faciles à mettre en œuvre.

Les résultats des essais nous montrent que les caractéristiques du courant post-arc fournissent pour certains appareils un critère de l'approche de la limite du pouvoir de coupure. On pourra ainsi prévoir ce plafond sans avoir besoin de le contrôler par une non-coupure.

Les courants post-arc ont une répercussion directe sur la tension de rétablissement. Celle-ci est fortement amortie par la présence d'une conductivité résiduelle et le régime libre de l'oscillation ne commence qu'à partir de la disparition du courant post-arc.

On pourra également établir une comparaison valable entre les qualités respectives des différentes variantes de construction du même appareil sans avoir recours à des essais destructifs.

Les résultats obtenus par le modèle mathématique de l'arc se rapprochent des résultats obtenus par les mesures directes sur l'appareil. L'amplitude et la durée du courant post-arc obtenu par le calcul dépendent des valeurs choisies pour la constante de temps de l'arc et la puissance de refroidissement et l'on peut espérer déterminer expérimentalement ces paramètres par des mesures précises de courants post-arc réels.

Il sera alors possible de préciser quantitativement, par l'utilisation de l'ordinateur, l'influence des différents facteurs, soit dans l'accumulation de l'énergie dans l'espace d'arc, soit dans la dissipation de cette énergie.

Ce travail a été effectué aux Laboratoires de Recherches Générales MERLIN GERIN, en collaboration avec le Laboratoire d'Electotechnique de l'Institut Polytechnique de Grenoble.

J'exprime ma reconnaissance à Monsieur le Professeur PILLET, qui a apporté un grand intérêt à mes recherches et a participé activement à l'évolution de cette étude. Pour ses conseils et pour son soutien moral dont j'ai constamment bénéficié, je le prie d'accepter ici l'expression de ma profonde gratitude.

Je remercie Monsieur le Professeur POLOUJADOFF et Monsieur IVANES, maître de conférences, d'avoir bien voulu participer au Jury.

J'adresse toute ma reconnaissance à Monsieur PELENC, Chef du Département Recherches Générales MERLIN GERIN, qui m'a donné toutes les facilités pour la réalisation de cette étude et le développement de celle-ci n'a été rendu possible que par son aide et ses conseils fructueux.

Je suis très reconnaissant à Monsieur BERNARD, Ingénieur de Recherche au Département Recherches Générales MERLIN GERIN, qui, par son aide et ses conseils éclairés, a contribué à l'avancement de ce travail.

J'adresse ma profonde gratitude à la direction MERLIN GERIN, qui m'a accordé toutes les facilités dans l'usine pour la réalisation de ce travail.

J'adresse également mes remerciements à Monsieur DEWEZE, Chef du Service Documentation MERLIN GERIN, pour l'obligeance avec laquelle il s'est occupé de l'édition.

Je remercie chaleureusement tous les ingénieurs, techniciens, projeteurs et le personnel du Département Recherches Générales, pour l'aide technique qu'ils m'ont apportée et l'atmosphère favorable qu'ils ont créée pour la réalisation de ce travail.

Vinayak POTEY

BIBLIOGRAPHIE

A. ALLIAN ; D.F. AMER : «The extinction of arcs in air blast circuit-eakers, J. of the I.E.E., part II, 1947, p. 333

W.E. BERKEY ; R.C. van SICKLE: «Arc extinction phenomena in high ltage circuit breakers», Trans. A.I.E.E., 1933, vol. 52, p. 850

U. BEHMANN ; J. SIEBERT: «Die Grenzfrequenz von Nachstrom esseinrichtungen», ETZ, partie A, No 85, 1964, p. 139

T.E. BROWNE: «Study of a.c. arc behaviour near current zero by means of athematical models», Trans. A.I.E.E., 1948, vol. 67, p. 141

P. BALTENSPERGER ; P. SCHMID: «Courant et conductibilité post-arc ns les disjoncteurs à haute tension», Bull. de l'Assoc. Suisse des Electriciens, 47, 1956, No 8, p. 333

G. BERNARD: «Etude et réalisation d'un transformateur de courant et de nsion à effet magnéto-optique utilisable en très haute tension», Thèse de Jniversité de Grenoble, 8 juil. 1966

J. BIERMANS: «Fortschritte im Bau von Druckgasschaltern», ETZ, partie No 59, 1938, p. 194

J. BLASE: «Les courants post-arc dans les disjoncteurs», ACEC Revue, No 1960, p. 18

A.M. CASSIE: «Théorie nouvelle des arcs de rupture et de la rigidité des rcuits», C.I.G.R.E, Rapport No 102, 1939

). A.M. CASSIE: «Conductibilité post-arc dans les disjoncteurs neumatiques», C.I.G.R.E., Rapport No 103, 1956

. A.M. CASSIE ; F.O. MASON: «The accurate recording of post-arc currents shunt and amplifier», E.R.A. Report, No G/XT 162, 1960

2. B. GRANCOIN: «Les générateurs à effet Hall de précision», Electronique dustrielle, avril 1968, p. 203

3. P. HÉROIN ; Ch. BENOIST ; Y. DELAMARRE«Mesure d'un courant par ampéremètre à effet Faraday», Rev. Gén. Elect, juil.-août 1967, tome 76, o7-8, p. 1045

4. A. HOCHRAINER: «Der Nachstrom in Leistungsschaltern», ETZ A, No 9, oct. 1952, p. 627

5. D.Th.J.ter HORST ; G.A.W. RUTGERS: «La physique des arcs électriques ns les disjoncteurs pneumatiques», Bull. de l'A.I.M., No 3, mars 1957

6. D.Th.J.ter HORST ; G.A.W. RUTGERS: «Phénomènes liés au zéro du urant dans les arcs de disjoncteur pneumatique en courant alternatif», I.G.R.E., Rapport No 122, 1956

7. H. KOPPLIN ; E.SCHMIDT «Post-arc currents, their measurements and eir importance for the interpretation of interruptions in high voltage low oil ntent circuits breakers», C.I.G.R.E., Rapport No 107, 1960

8. F. KUHRT ; K. MAZZ: «Messung hoher Gleichströme mit llgeneratoren», ETZ, partie A, 1956, p. 487

9. H. LILEN: «Principe et application des circuits intégrés linéaires», Editions adio, Paris, 1968

20. O. MAYR: «Beiträge zur Theorie des statischen und des dynamischen Lichtbogens», Archiv für Elektrotechnik, No 37,1943, p. 588

21. Y. PELENC: «Problèmes fondamentaux de l'appareillage électrique», Rev. Gén. Elect., t. 79, No 6, juin 1970, p. 464

22. Y. PELENC ; G. BERNARD: «Prototype industriel de transformateur de courant à effet magnéto-optique», Rev. Gén. Elect., t. 76, No 78, p. 1055

23. E. PILLET: Cours d'Électrotechnique à l'ENSEHRG, tome 1

24. V. POTEY: «Mesure du courant post-arc» ; «Ampéremètre à effet Hall, RG-3701» ; «Déclencheur au zéro du courant à effet Hall, RG-3702» ; «Alimentation stabilisée, RG-3703» (Notes Intérieures Département Recherches Générales MERLIN GERIN)

25. Radiotechnique; documentations sur les cellules photo-électriques

26. Radiotechnique; documentations sur les circuits magnétiques en ferrite

27. W. RIEDER ; J. PASSAQUIN: «On the decrease of the current to zero and the residual current in circuit breakers», C.I.G.R.E., Rapport No 105, 1960

28. W. RIEDER ; J. URBANEK: «Nouveaux aspects des recherches de l'effet du passage à zéro du courant sur les réamorçages dans les disjoncteurs», C.I.G.R.E., Rapport No 107, 1966

29. W. RIEDER ; H.D. KUHN: «Bedeutung und Schwierigkeiten der sogenannten «Nachstrom» Messungen», S.T.Z., vol. 58, 1961, p. 609

30. M.N. SAHA: «Versuch einer Theorie der physikalischen Erscheinungen bei hohen Temperaturen mit Anwendungen auf die Astrophysik», Zeitschrift für Physik, vol. 6, 1921, p. 40-55

31. SIEMENS: Documentation sur les générateurs à effet Hall

32. SIEMENS: Manuel semiconducteur, 1968, chapitre No 7

33. J. SLEPIAN: «Extinction of an a.c. arc», Trans. A.I.E.E., vol. 47 1928, p. 1398

34. W. SPRUTH: «Messung des Nachstromes an Hochleistungsschaltern», Archiv für Elektrotechnik, No 43, 1958, p. 427 (Diss. TH Aachen, 1956/1957)

35. S. TESZNER ; A. GUILLAUME ; P. FOURMARIER ; J. BLASE ; P. WALCH: «Contribution à l'étude des courants post-arc dans les interrupteurs à haute tension», C.I.G.R.E., Rapport No 130, 1952

36. S. TESZNER ; P. DUFOUR ; A. GUILLAUME ; V. DELEVOY: «Le courant post-arc et son interprétation en fonction des caractéristiques de l'interrupteur et du circuit», C.I.G.R.E., Rapport No 148, 1958

37. T. USHIO: «Post-arc current in circuit breakers», Mitsubishi Denki Laboratory Reports, vol. 30, 1956, p. 11

38. K.H. YOON ; H.E. SPINDLE: «A study of the dynamic reponse of arcs in various gases», Trans. A.I.E.E., vol. 78, 1959, p. 1634

39. V.ZAJIC ; V. TAIMR: «Nachstrommessungen an magnetischen Schaltern b Kurzschlussversuchen», Elektrotechn. Obz., vol. 42, 1953, p. 375

Voir aussi «La Bibliographie sur l'arc et les phénomènes liés à l'arc dans les disjoncteurs à courant alternatif», préparée au Département Recherches Générales MERLIN GERIN, par V. POTEY.

Dernière page d'une thèse

VU

Grenoble, le 9 Février 1972

le Président de la thèse

E. PILLET
Professeur à la Faculté des Sciences
Directeur du Laboratoire
d'électrotechnique

VU, et permis d'imprimer,

Grenoble, le

le Président de l'Université
Scientifique et Médicale